



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR –TL184834

**STUDI PERBANDINGAN SIMULASI DELAMINASI
MENGUNAKAN METODE COHESIVE ZONE MODEL (CZM)
DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE TECHNIQUE (VCCT) PADA
MATERIAL KOMPOSIT GLASS FIBER-REINFORCED
POLYMER (GFRP) DAN CARBON FIBER-REINFORCED
POLYMER (CFRP)**

**DIMAS BAGUS SETIAWAN
NRP. 0251154000087**

**Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR–TL 184834

**STUDI PERBANDINGAN SIMULASI DELAMINASI
MENGUNAKAN METODE COHESIVE ZONE MODEL
(CZM) DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE TECHNIQUE
(VCCT) PADA MATERIAL KOMPOSIT GLASS FIBER-
REINFORCED POLYMER (GFRP) DAN CARBON FIBER-
REINFORCED POLYMER (CFRP)**

DIMAS BAGUS SETIAWAN
NRP. 0251154000087

Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT–TL 184834

**COMPARISON STUDY OF DELAMINATION
SIMULATION USING COHESIVE ZONE MODEL (CZM),
AND VIRTUAL CRACK CLOSURE TECHNIQUE (VCCT)
METHODS IN THE MATERIALS OF THE COMPOSITE
GLASS FIBER-REINFORCED POLYMER (GFRP) AND
CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER (CFRP)**

DIMAS BAGUS SETIAWAN
NRP. 0251154000087

Supervisors

Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph. D.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(This page is intentionally left blank)

**STUDI PERBANDINGAN SIMULASI DELAMINASI
MENGUNAKAN METODE *COHESIVE ZONE MODEL*
(CZM) DAN *VIRTUAL CRACK CLOSURE TECHNIQUE*
(VCCT) PADA MATERIAL KOMPOSIT *GLASS FIBER-
REINFORCED POLYMER (GFRP)* DAN *CARBON FIBER-
REINFORCED POLYMER (CFRP)***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DIMAS BAGUS SETIAWAN
NRP 02511540000087

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D..... (Pembimbing 1)
2. Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si..... (Pembimbing 2)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**STUDI PERBANDINGAN SIMULASI DELAMINASI
MENGUNAKAN METODE COHESIVE ZONE MODEL
(CZM) DAN VIRTUAL CRACK CLOSURE TECHNIQUE
(VCCT) PADA MATERIAL KOMPOSIT GLASS FIBER-
REINFORCED POLYMER (GFRP) DAN CARBON FIBER-
REINFORCED POLYMER (CFRP)**

Nama : Dimas Bagus Setiawan
NRP : 0251154000087
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstrak

Komposit digunakan untuk pengganti logam, dengan mempertimbangkan kekuatan yang tidak berbeda jauh dengan logam. Glass fiber-reinforced polymer (GFRP) dan carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) merupakan dua komposit yang saat ini banyak digunakan. Namun pada penggunaannya komposit dapat mengalami kegagalan. Salah satu kegagalan material komposit adalah delaminasi, yakni lepasnya laminat-laminat antar lapisan (layer) material komposit. Pada penelitian ini, telah dilakukan perbandingan hasil simulasi delaminasi dengan tujuan mencari metode terbaik pada 2 metode berbeda yakni, Cohesive Zone Model (CZM), dan Virtual Crack Closure Technique (VCCT) pada dua material berbeda yakni, carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) dan glass fiber-reinforced polymer (GFRP). Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Workbench Mechanical, dimana terlebih dahulu dilakukan analisa mesh sensitivity untuk menentukan ukuran elemen paling optimal, dimana didapat ukuran 0.4 mm merupakan yang paling optimal. Setelah itu dilakukan analisa karakterisasi delaminasi dengan mempelajari kurva stress-strain dan distribusi tegangan-regangan. Dari analisa tersebut, dengan menggunakan parameter, didapat VCCT merupakan metode terbaik karena sesuai dengan teori, memiliki

nilai margin error yang rendah, serta tidak memerlukan adanya preparasi delaminasi.

Kata kunci: Delaminasi, GFRP, CFRP, VCCT, CZM.

**COMPARISON STUDY OF DELAMINATION
SIMULATION USING COHESIVE ZONE MODEL (CZM),
AND VIRTUAL CRACK CLOSURE TECHNIQUE (VCCT)
METHODS IN THE MATERIALS OF THE COMPOSITE
GLASS FIBER-REINFORCED POLYMER (GFRP) AND
CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER (CFRP)**

Student Name : Dimas Bagus Setiawan
NRP : 0251154000087
Department : Material dan Metallurgical Engineering
Supervisor : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Co-Supervisor : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstract

Composites are used for metal substitutes, taking into account the strength that is not much different from the metal. Glass fiber-reinforced polymer (GFRP) and carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) are two composites that are currently widely used globally. However, the use of composites can fail. One of the failures of composite materials is delamination, which is the removal of laminates between layers of composite materials. In this study, a comparison of delamination simulation results have been conducted with the aim of finding the best method in 2 different methods namely, Cohesive Zone Model (CZM), and Virtual Crack Closure Technique (VCCT) on two different materials namely, carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) and glass fiber-reinforced polymer (GFRP). The simulation is done using ANSYS Workbench Mechanical, where first a mesh sensitivity analysis is performed to determine the most optimal element size, where the 0.4 mm size is the most optimal. After that the delamination characterization is analyzed by studying the stress-strain curve and the stress-strain distribution. From this analysis, using parameters, obtained VCCT is the best method because it is in accordance with the theory, has a low error margin value, and does not require any delamination preparation.

Keywords: *Delamination, GFRP, CFRP, VCCT, CZM.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa berkat rahmat dan karunia-Nya penelitian Tugas Akhir dengan judul “**Analisa Perbandingan Hasil Permodelan Delaminasi dengan Menggunakan Metode *Cohesive Zone Model (CZM)* dan *Virtual Crack Closure Technique (VCCT)* pada Komposit *Glass Fiber-reinforced Polymer (GFRP)* dan *Carbon Fiber-reinforced Polymer (CFRP)*” dapat terlaksanakan dengan baik dan dapat selesai tepat pada waktunya. Tujuan dari penyusunan Laporan Tugas Akhir adalah untuk memenuhi salah satu syarat akademis yang wajib dipenuhi dalam kuliah program studi Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.**

Terselesaikannya Laporan Tugas Akhir tidak luput dari bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kasih kepada:

1. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D dan Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
2. Orang tua yang selalu mendukung serta memberikan doa selama penelitian tugas akhir dan penyusunan laporan.

Penulis menyadari penyusunan laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat berguna bagi penulis dan semua pihak yang terkait.

Surabaya, 20 Januari 2020
Penulis

Dimas Bagus Setiawan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Material Komposit.....	5
2.2 Matriks.....	15
2.3 Penguat (<i>Reinforcements</i>).....	23
2.4 Elastisitas dan Kekuatan Laminat.....	30
2.5 Konsep Kegagalan Material	40
2.6 Delaminasi.....	44
2.7 Metode Analisa Numerik (<i>Finite Element Methode</i>).....	50
2.8 Formulasi Elemen Struktur.....	66
2.9 Analisis Numerik pada Delaminasi	74
2.10 Penelitian Sebelumnya	92
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	99
3.2 Spesifikasi Material Komposit	100
3.3 Peralatan dan Piranti Lunak Peneitian.....	101
3.4 Variabel Penelitian	102
3.5 Tahapan Penelitian	102

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis Data.....	111
4.2 Analisis Variasi Metode dan Material terhadap Karakteristik Delaminasi	119
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	129
5.2 Saran.....	129
DAFTAR PUSTAKA	131
LAMPIRAN	135
BIOGRAFI PENULIS.....	141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Contoh dari Material Komposit: <i>Velg</i> (kiri) dan <i>Wing</i> (kanan) yang merupakan material komposit <i>Carbon Fiber-reinforced Polymer</i>6
Gambar 2.2	Perbandingan sifat mekanik antara baja, aluminum, dan komposit7
Gambar 2.3	Beberapa klasifikasi fiber penguat berdasarkan bentuk tulangan 8
Gambar 2.4	Ilustrasi lapisan laminat dari laminasi komposit 11
Gambar 2.5	Komposisi Laminat Komposit (a.) Unidrieksional (b.) Simetrik <i>Angle-ply</i> 15
Gambar 2.6	Tiga bentuk kristal pada logam: (a) FCC, (b) BCC, (c) HCP 16
Gambar 2.7	Susunan Molekul Polimer: (a) Amorfus, (b) Semikristalin 19
Gambar 2.8	Struktur kimia dari grup epoksi 20
Gambar 2.9	Grafik hubungan antara kekuatan (σ_f) karbon fiber dengan peningkatan diameter fiber 24
Gambar 2.10	Hubungan diameter serat berbagai material dengan Modulus <i>Young</i> 27
Gambar 2.11	Penampang melintang beam, (a) <i>solid in-fill</i> , (b) <i>hollow square tube</i> 31
Gambar 2.12	Asumsi deformasi pada FSDT 33
Gambar 2.13	Kaidah untuk rotasi plat atau kerangka (<i>shell</i>) 33
Gambar 2.14	Resultan Tegangan pada Elemen Kerangka (<i>shell</i>): (a) Gaya per satuan panjang, (b) momen per satuan panjang, dan (c) definisi teori rotasi rangka (<i>shell</i>) \emptyset dibanding dengan orientasi dalam matematika 36

Gambar 2.15	Retak dan Orientasi Arah; (kiri) retak pada pelat 2D, dan (kanan) retak pada benda pejal atau padat 3D.....	40
Gambar 2.16	Jenis-jenis deformasi; (kiri) Mode-I, (tengah) Mode-II, dan (kanan) Mode-III.....	44
Gambar 2.17	Tipe Diskontinuitas Geometri dan Material	45
Gambar 2.18	Kriteria Delaminasi <i>Mixed-Mode</i>	47
Gambar 2.19	Hasil Eksperimen untuk rentangan G delaminasi onset	50
Gambar 2.20	Proses dari Analisa Elemen Hingga	52
Gambar 2.21	Perangkat Lunak CAD; (a) <i>SolidWorks</i> , (b) <i>Autodesk Inventor</i> , dan (c) <i>Autodesk AutoCAD</i>	54
Gambar 2.22	Analisa numerik menggunakan piranti lunak FEM; (atas) aliran fluida pada <i>spiral tube</i> (bawah) fragmentasi amunisi <i>frangible</i>	55
Gambar 2.23	Model Contoh – Gerobak; Analisa pegas dan batang (<i>beam</i>) pada gerobak dalam sistem model matematika diskret	58
Gambar 2.24	Deformasi beam tanpa efek geser (<i>shear</i>)	68
Gambar 2.25	Deformasi beam dengan efek geser (<i>shear</i>)	68
Gambar 2.26	Asumsi dan analisa pada deformasi pelat.....	71
Gambar 2.27	Delaminasi akibat buckling pada laminat terkompresi	74
Gambar 2.28	Tipe-tipe <i>beam</i> dalam delaminasi.....	75
Gambar 2.29	Mode zona kohesif untuk simulasi pertumbuhan retakan	78
Gambar 2.30	Model pergeseran tegangan pada CZM.....	79
Gambar 2.31	Mode pertumbuhan retak (<i>crack</i>); (a) I-pembuka, (b) II-geser, (c) III-robek.....	80
Gambar 2.32	Model dan distribusi VCCT	89
Gambar 2.33	Perbandingan dari kurva beban	

	<i>displacement</i> dengan hasil FEM.....	95
Gambar 2.34	Pola patahan pada baja AISI 4340 dengan inisiasi retak (a) 10mm, dan (b) 20mm dengan pembebanan <i>displacement</i> 0.3m	97
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	99
Gambar 3.2	Diagram Alir Simulasi	103
Gambar 3.3	Input sifat mekanik pada <i>Engineering Data Library</i>	104
Gambar 3.4	Dimensi dari geometri penelitian	104
Gambar 3.5	Geometri setelah dilakukan <i>meshing</i>	105
Gambar 3.6	<i>Interface</i> dari Modul ANSYS ACP.....	106
Gambar 3.7	<i>Interface</i> AACP untuk pengaturan; material <i>fabric</i> (kiri) dan orientasi elemen (kanan)	106
Gambar 3.8	Pengaturan untuk melakukan <i>geometry meshing</i>	107
Gambar 3.9	Pengaturan untuk <i>Analysis settings</i>	107
Gambar 3.10	Pengaturan <i>Boundary Conditions</i> untuk <i>Presimulations</i> (atas) dan untuk <i>Interface Delaminations</i> (bawah)	108
Gambar 4.1	Perbandingan mesh pada nilai F_{crit} pada skala asli (kiri) dan diperbesar (kanan) pada material CFRP; (a) Metode CZM, (b) Metode VCCT	111
Gambar 4.2	Perbandingan mesh pada nilai F_{crit} pada skala asli (kiri) dan diperbesar (kanan) pada material GFRP; (a) Metode CZM, (b) Metode VCCT	112
Gambar 4.3	Grafik <i>Stress-Strain</i> pada CFRP (a) dan GFRP (b)	118
Gambar 4.4	Hasil Equivalent Stress pada Metode (a) CZM dan (b) VCCT.....	120
Gambar 4.5	Tampak Isometric Distribusi Tegangan pada Metode (a) CZM dan (b) VCCT	121
Gambar 4.6	Hasil Equivalent Elastic Strain dari	

	Metode (a) CZM dan (b) VCCT.....	122
Gambar 4.7	Hasil <i>Equivalent Stress</i> pada Metode (a) CZM dan (b) VCCT	122
Gambar 4.8	Tampak <i>Isometric</i> Distribusi Tegangan pada Metode (a) CZM dan (b) VCCT	123
Gambar 4.9	Hasil <i>Equivalent Elastic Strain</i> Metode (a) CZM dan (b) VCCT	124

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat dan Karakter dari Epoksi.....	21
Tabel 2.2	Sifat Mekanik Poliester.....	22
Tabel 2.3	Komposisi dari Serat Kaca.....	27
Tabel 2.4	Sifat Mekanik Berbagai Macam Serat Kaca.....	28
Tabel 2.5	Sifat Mekanik Beberapa Jenis Serat Karbon.....	30
Tabel 2.6	Prediksi beban kritis pada <i>crack-initiation</i> untuk <i>cross-ply</i>	95
Tabel 3.1	Spesifikasi Teknis Material Penelitian.....	100
Tabel 3.2	Variabel Penelitian.....	102
Tabel 4.1	Hasil Mesh Sensitivity Analysis	115
Tabel 4.2	Perbandingan Parameter Karakteristik Delaminasi	125
Tabel 4.3	Perbandingan Akhir Setiap Metode Delaminasi.....	125

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material komposit saat ini banyak digunakan untuk substituve metal materials, dengan mempertimbangkan harga yang jauh lebih ekonomis, namun memiliki kekuatan dan sifat yang tidak berbeda jauh dengan logam. *Glass fiber-reinforced polymer* (GFRP) dan *carbon fiber-reinforced polymer* (CFRP) merupakan dua material komposit yang saat ini umum dan banyak digunakan secara global. Namun pada penggunaannya, dua jenis material komposit umum mengalami deformasi, bahkan mengalami kegagalan material. Salah satu kegagalan material kompoit adalah delaminasi, yakni lepasnya atau robeknya laminat-laminat antar lapisan (*layer*) material komposit. Delaminasi terjadi ketika penguat antar lapisan laminat mengalami beban geser yang melampaui sifat mekanik material komposit.

Fenomena delaminasi dapat dianalisis secara numerik. Dengan bantuan software pemodelan, akan dibuat artificial delamination dengan geometri yang sederhana dan dengan simulasi elemen hingga akan lebih mudah untuk dilakukan (Wang, 2015). Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *cohesive zone method*. *Cohesive zone models* (CZMs) yaitu metode berbasis metode elemen hingga / *finite element method* (FEM) berdasarkan model dimana terdapat area antarmuka (interface) diantara dua layer dan dimodelkan dengan *cohesive zone element* (Pascoe, 2013).

Oleh karenanya, untuk mendapatkan perambatan retak delaminasi pada material komposit, diperlukan metode numerik yang tepat dengan variabel dan parameter yang efektif untuk mendapatkan metode numerik dengan hasil yang sangat akurat. Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis numerik terhadap perambatan retak delaminasi pada material komposit serat kaca (GFRP) dan serat karbon (CFRP), dengan membandingkan karakteristik dan nilai acuan untuk setiap metode VCCT dan CZM,

serta melakukan validasi hasil numerik dengan eksperimen yang telah dilakukan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang di atas, dapat diambil beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah hasil simulasi numerik delaminasi material komposit serat kaca (*glass fiber*) dan serat karbon (*carbon fiber*) dengan teknik VCCT dan CZM, dibandingkan dengan pendekatan teoritis ?
2. Bagaimanakah karakterisasi delaminasi untuk material komposit serat kaca (*glass fiber*) dan serat karbon (*carbon fiber*) ?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kondisi fisik material komposit dianggap sempurna.
2. Pengaruh fisik eksternal (temperatur, elektrik, dan lain sebagainya) dianggap tidak ada.

1.4 Tujuan Penelitian

Dengan adanya beberapa rumusan masalah yang telah tertulis di atas, terdapat tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Menganalisis hasil simulasi numerik delaminasi material komposit serat kaca (*glass fiber*) dan serat karbon (*carbon fiber*) dengan teknik VCCT dan CZM dibandingkan dengan pendekatan teoritis.
2. Menganalisis karakterisasi delaminasi untuk material komposit serat kaca (*glass fiber*) dan serat karbon (*carbon fiber*).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapat dari penelitian ini adalah adanya referensi untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang lebih mendalam dan spesifik terkait delaminasi. Selain itu juga dapat memudahkan pihak di bidang dan sektor industri untuk memproduksi material komposit dengan kualitas yang lebih bagus.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Komposit

Komposit didefinisikan sebagai suatu material yang terdiri dari dua komponen atau lebih yang memiliki sifat atau struktur yang berbeda yang dicampur secara fisik menjadi satu membentuk ikatan mekanik yang dengan struktur homogen secara makroskopik dan heterogen secara mikroskopik. Material campuran tersebut akan menghasilkan material yang baru yang memiliki sifat unggul dari material pembentuknya. Dengan penggabungan dua atau lebih material yang berbeda, maka dapat diperbaiki dan dikembangkan sifat-sifat mekanik dan fisik dari material-material tersebut diantaranya adalah: kekuatan, kekakuan, ketahanan korosi, ketahanan gesek, konduktivitas termal, insulasi listrik, insulasi panas, ketahanan fatik, dan lain-lain (Sulistijono, 2012).

Pada dasarnya, kita dapat mempertimbangkan komposit sebagai bahan apa saja yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih konstituen yang berbeda. Definisi ini akan mencakup batu bata, beton, kayu, tulang, serta komposit sintesis modern seperti plastik yang diperkuat serat (FRP). Perkembangan komposit dalam 50 tahun terakhir telah berhasil menurunkan kuantitas massa tanpa mengurangi performa dan abilitas dari komposit. Bahan-bahan seperti itu kadang-kadang disebut sebagai high-performance composites, dan sering kali terdiri dari serat karbon dan resin epoksi (Matthews, 2000). Gambar 2.1 menunjukkan beberapa jenis high-performances composites yang banyak digunakan untuk kebutuhan otomotif, teknik, maupun manufaktur.

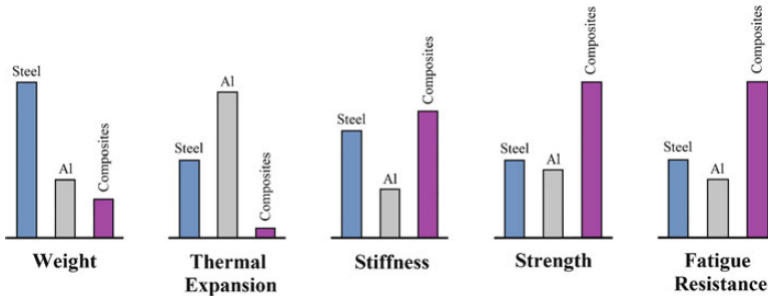


Gambar 2.1 Contoh dari Material Komposit: *Velg* (kanan) dan *Wing* (kiri) yang merupakan material komposit *Carbon Fiber-reinforced Polymer* (Top Gear, 2016)

Namun, penggunaan secara umum, bahan komposit dibatasi untuk menekankan material yang mengandung konstituen matriks kontinu yang terikat (*binded*) bersama dan membentuk kesatuan konstituen yang lebih kuat dan rigid. Material komposit yang dihasilkan memiliki keseimbangan sifat struktural dan performa yang lebih baik daripada material penyusunnya. Sifat struktural yang ditingkatkan umumnya dihasilkan dari mekanisme pembagian beban (ASM, 2001).

Komposit umumnya dibedakan dengan dua klasifikasi berbeda. Klasifikasi pertama biasanya dibuat sehubungan dengan konstituen matriks. Material komposit yang terdapat dalam klasifikasi ini adalah komposit matriks-organik (*organic-matrix composites*, OMC), komposit matriks-logam (*metal-matrix composites*, MMC), dan komposit matriks-keramik (*ceramic-matrix composites*, CMC). Istilah "komposit matriks-organik" umumnya diasumsikan mencakup dua kelas komposit: komposit matriks-polimer (*polymer-matrix composites*, PMC) dan komposit matriks-karbon (*carbon-matrix composites*, CMC). Komposit karbon-matriks biasanya disintesis dari PMC dengan karbonasi dan peningkatan densitas dari matriks polimer penyusunnya. Dalam setiap sistem ini, matriks biasanya merupakan fase kontinu di seluruh komponen (ASM, 2001). Gambar 2.2 menunjukkan

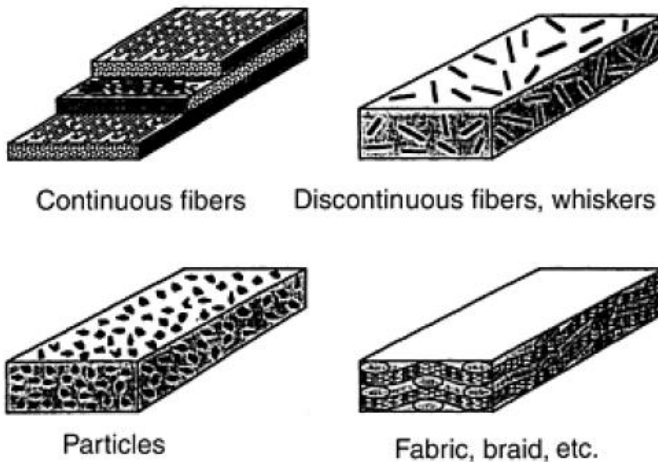
perbandingan antara baja, aluminum dan komposit pada beberapa sifat mekanik dari masing-masing material.



Gambar 2.2 Perbandingan sifat mekanik antara baja, aluminum, dan komposit. (Chawla, 2013)

Klasifikasi tingkat kedua mengacu pada bentuk tulangan — particulate reinforcements, whisker reinforcements, continuous fiber laminated composites, and woven composites sebagaimana digambarkan dalam Gambar 2.3. Untuk memberikan peningkatan sifat, umumnya harus ada fraksi volume substansial (~ 10% atau lebih) dari tulangan. Penguatan dianggap sebagai "partikel" jika semua dimensinya diperkirakan sama. Dengan demikian, komposit yang diperkuat partikulat (particulate-reinforced composites) termasuk yang diperkuat oleh bentuk-bentuk partikulat lain seperti bola, batang, serpih, dan masih banyak bentuk lain dari sumbu yang kira-kira sama. Penguat whisker (whisker reinforcements), dengan rasio aspek biasanya berkisar dalam rentang sekitar 20 hingga 100, sehingga sering dipertimbangkan bersama dengan partikulat dalam MMC. Bersama-sama, ini diklasifikasikan sebagai penguat "discontinuous", karena fase penguat terputus-putus untuk fraksi volume rendah yang biasanya digunakan dalam MMC. Ada juga bahan, biasanya polimer, yang mengandung partikel yang memanjang daripada memperkuat bahan. Ini umumnya disebut sebagai sistem "diisi". Karena partikel pengisi dimasukkan untuk tujuan pengurangan biaya daripada penguatan,

komposit ini umumnya tidak dianggap sebagai komposit partikulat. Meskipun demikian, dalam beberapa kasus pengisi juga akan memperkuat bahan matriks. Hal yang sama mungkin berlaku untuk partikel yang ditambahkan untuk keperluan nonstruktural, seperti tahan api, kontrol susut, dan peningkatan konduktivitas termal atau listrik (Donaldson, 2001).



Gambar 2.3 Beberapa klasifikasi fiber penguat berdasarkan bentuk tulangan (Donaldson, 2001)

2.1.1 Aturan Campuran (*Rule of Mixtures*)

Sebuah material komposit diberi beban berupa tegangan uniaksial σ_u (Alger, 1997). Sesuai dengan hukum Hooke, jika material komposit dalam keadaan awal atau utuh, maka regangan fiber ε_f haruslah sama dengan regangan matriks ε_m , dimana dinyatakan dalam persamaan (2.1):

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad (2.1)$$

dimana $\sigma_f, E_f, \sigma_m, E_m$ berturut-turut merupakan tegangan fiber, modulus fiber, tegangan matriks, dan modulus matriks. Karena tegangan merupakan gaya per satuan luas, maka:

$$\sigma_u = f\sigma_f + (1 - f)\sigma_m \quad (2.2)$$

dimana f merupakan fraksi volume fiber dan $(1 - f)$ merupakan fraksi volume matriks dalam komposit. Jika diasumsikan bahwa suatu material komposit berperan sebagai material linear-elastis, maka kesetimbangan hukum Hooke:

$$\sigma_u = E_c \varepsilon_c \quad (2.3)$$

dimana E_c merupakan modulus elastis komposit dan ε_c merupakan regangan komposit. Sehingga persamaan (2.1) dan (2.2) dapat disubstitusi ke persamaan (2.4) menjadi:

$$E_c \varepsilon_u = fE_f \varepsilon_f + (1 - f)E_m \varepsilon_m \quad (2.4)$$

karena beban diberikan secara uniaksial, sehingga $\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_u$, maka persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$E_c = fE_f + (1 - f)E_m \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) merupakan persamaan umum yang banyak digunakan dan disebut sebagai persamaan aturan pencampuran (*rules of mixtures equation*) (Alger, 1997). Dalam ilmu material, aturan campuran (rule of mixtures) adalah perhitungan matematis yang digunakan untuk memprediksi berbagai sifat material komposit yang terdiri dari serat kontinu dan searah. Ini memberikan batas teoritis atas dan batas bawah pada sifat-sifat seperti modulus elastis, kepadatan massa, kekuatan tarik utama, konduktivitas termal, dan konduktivitas listrik. Secara umum ada dua model, satu untuk beban aksial (model Voigt), dan

satu untuk beban melintang (model Reuss). Untuk beberapa sifat material (seringkali modulus elastis), aturan campuran (rule of mixtures) menyatakan bahwa keseluruhan properti dalam arah yang sejajar dengan serat dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_c = fE_f + (1 - f)E_m \quad (2.6)$$

Dimana:

f merupakan volume fraksi fiber

E_f merupakan sifat material fiber

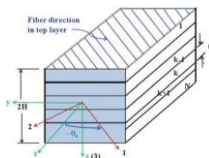
E_m merupakan sifat material matriks

Dalam kasus modulus elastis, ini dikenal sebagai modulus batas atas, dan sesuai dengan beban yang paralel dengan serat. Aturan invers campuran menyatakan bahwa dalam arah tegak lurus terhadap serat, nilai minimum modulus elastis suatu komposit dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_c = \left(\frac{f}{E_f} + \frac{1 - f}{E_m} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

2.1.2 Laminasi Komposit

Laminasi komposit merupakan susunan dari beberapa lapisan pada material komposit berserat, yang dapat disesuaikan untuk memberikan berbagai sifat rekayasa, termasuk kekakuan bidang, kekakuan lentur, kekuatan, dan koefisien ekspansi termal (Herakovich, 2017). Gambar 2.4 merupakan ilustrasi dari laminasi komposit.



Gambar 2.4 Ilustrasi lapisan laminat dari laminasi komposit (Herakovich, 2017)

Lapisan individu yang terdiri dari serat dengan nilai modulus Young yang tinggi, tertanam dalam bahan matriks polimer, logam, atau keramik. Serat yang saat ini banyak digunakan meliputi karbon, kaca, aramid, boron, dan silikon karbida. Bahan matriks yang digunakan termasuk resin termoplastik dan termoset, keramik, dan logam (Herakovich, 2017).

Lapisan yang berasal dari bahan yang berbeda memungkinkan untuk digunakan, yang dapat menghasilkan laminasi hibrida. Lapisan individu dari laminat umumnya adalah ortotropik (sifat utama dalam arah ortogonal) atau isotropik transversal (sifat isotropik dalam bidang transversal pada lapisan laminat). Laminat dapat menunjukkan sifat anisotropik (arah variabel dari properti utama), ortotropik, atau quasi-isotropik. Laminat quasi-isotropik menunjukkan respons inplane dari isotropik (tidak tergantung arah), tetapi tidak menunjukkan respons isotropik keluar-bidang (lentur). Bergantung pada urutan dari masing-masing lapisan, laminasi dapat menunjukkan penggandengan antara respons inplane dan out-of-plane. Contoh kopling lentur adalah adanya kelengkungan yang berkembang sebagai akibat dari pemuatan inplane. Demikian juga, strain inplane dapat berkembang sebagai hasil beban dari momen untuk laminasi yang tidak simetris (Herakovich, 2017).

2.1.3 Bidang Tegangan Material Ortotropik

Lapisan komposit berserat searah dapat direpresentasikan sebagai material ortotropik yang homogen dengan sifat efektif dalam arah 1, 2, dan 3. Untuk tegangan bidang pada bidang 1-2, dan menggunakan notasi komposit yang dikurangi, persamaan konstitutif dapat ditulis:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \nu_{21} \frac{\sigma_2}{E_2} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_1 = -\nu_{21} \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2}$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}$$

Persamaan konstitutif di atas dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ \nu & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Dalam persamaan 2.9 E_1 adalah modulus dalam arah 1 (serat), E_2 adalah modulus dalam arah 2 (melintang), G_{12} adalah modulus geser pada bidang 1-2, ν_{12} adalah rasio Poisson untuk pembebanan ke arah 1, dan ν_{21} adalah rasio Poisson untuk memuat dalam arah 2. Matriks 3x3 dalam tanda kurung pada persamaan (16.2) adalah matriks kekakuan (*stiffness matrix*) [Q] untuk lapisan searah (*unidirectional layer*). Ini dapat ditransformasikan ke orientasi lain di mana ia diidentifikasi sebagai [\bar{Q}] (Herakovich, 2017).

2.1.4 Teori Laminasi Klasik

Teori laminasi menggambarkan respons laminasi komposit yang mengalami beban searah dan pembengkokan. Laminasi pada gambar 2.3 menggunakan sistem koordinat global x - y - z dengan z tegak lurus terhadap bidang laminasi dan positif ke bawah. Titik acuan (*origin*) sistem koordinat terletak pada bidang tengah laminasi. Laminasi memiliki N lapisan, diberi nomor dari atas ke bawah. Setiap lapisan memiliki orientasi serat yang berbeda θ_k .

Koordinat z ke bagian bawah hingga lapisan ke- k ditunjukkan oleh z_k dengan bagian atas layer berada di z_{k-1} . Ketebalan, t_k , dari setiap lapisan itu merupakan $t_k = z_k - z_{k-1}$. Permukaan atas laminasi dilambangkan z_0 dan ketebalan total $2H$ (Herakovich, 2017).

Diasumsikan bahwa setiap lapisan dapat direpresentasikan sebagai bahan homogen dengan sifat-sifat efektif yang diketahui dapat berupa isotropik, ortotropik, atau isotropik transversal dan bahwa ada ikatan sempurna antara lapisan-lapisan. Lebih lanjut, diasumsikan bahwa setiap lapisan berada dalam keadaan tegangan bidang dan laminasi berubah menurut asumsi Kirchoff (1850) untuk menekuk dan meregangkan pelat tipis (Herakovich, 2017).

2.1.5 Sifat Laminasi Efektif

Prediksi sifat-sifat efektif pada bidang dan sifat mekanik kesimetrisan dari laminasi komposit dapat ditentukan dari eksperimen-eksperimen dengan memulai dengan pada pusat bidang regangan pada persamaan 2.10 berikut ini,

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon^0\} \quad (2.10)$$

Untuk sifat efektif laminasi, dapat dilakukan perhitungan dan pendekatan dengan tegangan rata-rata di atas ketebalan laminasi. Dengan demikian, dicatat bahwa tegangan rata-rata laminasi $\{\bar{\sigma}\}$ ditulis sebagai berikut:

$$\{\bar{\sigma}\} \equiv \frac{\{N\}}{2H} \quad (2.11)$$

Dengan mengkombinasikan persamaan (2.10) dan (2.11), maka akan didapat persamaan rerata regangan pusat bidang pada laminasi sebagai:

$$\{\varepsilon^0\} = 2H[A]^{-1} \{\bar{\sigma}\} \quad (2.12)$$

pada persamaan 2.12, $[A]^{-1}$ merupakan invers dari $[A]$. Mengasumsikan bahwa:

$$2H[A]^{-1} \equiv [a^*] \quad (2.13)$$

dimana $[a^*]$ disebut dengan komplian laminat. Sehingga dapat diturunkan persamaan fundamental dari hubungan tegangan-regangan efektif untuk kesimetrisan, dari komposit laminat dengan melibatkan variabel komplian, dimana:

$$\{\varepsilon^o\} = [a^*]\{\bar{\sigma}\} \quad (2.14)$$

Persamaan 2.14 merupakan persamaan fundamental dari hubungan tegangan-regangan efektif untuk kesimetrisan komposit laminat. Persamaan ini dapat digunakan untuk berbagai macam eksperimen, untuk kondisi tegangan tertentu, untuk memprediksi hasil regangan, dengan demikian sifat efektif dari komposit laminat dapat ditentukan, misalnya konstanta teknis (Herakovich, 2017).

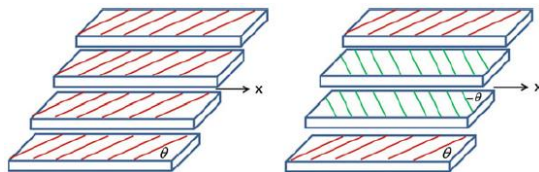
Komplian matriks $[a^*]$ secara umum dapat dijabarkan dengan bentuk matriks simetris dengan persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$[a^*] = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{16}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{26}^* \\ a_{16}^* & a_{26}^* & a_{66}^* \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Hubungan fundamental tegangan-regangan pada persamaan (2.14) sekarang dapat diekspresikan dengan bentuk persamaan 2.16 sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \varepsilon_{xy}^o \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* & a_{16}^* \\ a_{12}^* & a_{22}^* & a_{26}^* \\ a_{16}^* & a_{26}^* & a_{66}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_y \\ \bar{\tau}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

Contoh-contoh yang menunjukkan variabilitas konstanta teknik yang efektif sebagai fungsi orientasi serat dan urutan susun laminasi untuk searah, sumbu-lepas dan simetris, laminasi sudut-lapis disajikan sebagai berikut untuk komposit karbon/epoksi tertentu. Laminasi searah terdiri dari lapisan yang semuanya memiliki orientasi serat dan sifat material yang sama gambar 2.5 (a) dan (b). Laminasi simetris, sudut-lapis memiliki jumlah lapisan yang sama pada $+h$ dan orientasi serat h yang terletak secara simetris pada bidang tengah laminasi.



Gambar 2.5 Komposisi Laminat Komposit (a) Unidriksional (b) Simetrik *Angle-ply* (Herakovich, 2017)

Hasil dalam Gambar 2.5 (a), (b), (c), (d) menunjukkan salah satu keunggulan utama material komposit berserat, yaitu kemampuan untuk menyesuaikan sifat material melalui pemilihan orientasi serat, ketebalan lapisan, urutan susun, dan sifat material dari masing-masing lapisan. Hasil yang disajikan di sini adalah untuk komposit karbon / epoksi T300 / 5208. Komposit ini terdiri dari serat karbon T300 dalam matriks epoksi (5208). Prediksi teoritis telah diverifikasi oleh hasil eksperimen.

2.2 Matriks

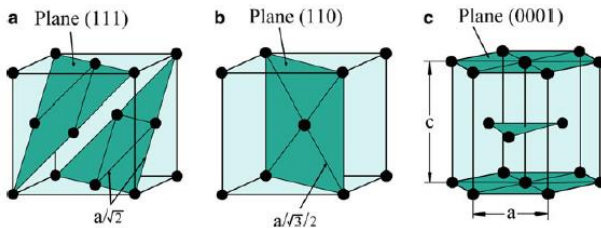
Matriks pada komposit merupakan fasa yang memberikan bentuk pada struktur komposit dengan cara mengikat penguat atau serat bersama-sama (Sulistijono, 2012). Menurut Gibson (2012), matriks secara umum memiliki fungsi: mengikat penguat atau serat menjadi satu kesatuan struktur, melindungi penguat atau serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan, tetap stabil setelah proses manufaktur, mentransfer dan mendistribusikan tegangan/beban

kerja ke penguat atau serat secara merata. Pemilihan material matriks dan penguat atau serat memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanik dan sifat komposit. Gabungan matriks dan penguat atau serat menghasilkan komposit yang mempunyai kekuatan dan kekakuan yang lebih tinggi. Material matriks yang umum digunakan pada komposit adalah logam, polimer dan keramik (Chawla, 2013).

2.2.1 Matriks Logam (*Metal Matrix Materials*)

Logam adalah bahan rekayasa yang sangat serbaguna (Chawla, 2013). Mereka dapat terdeformasi plastis, dan mereka dapat diperkuat dengan berbagai metode, kebanyakan melibatkan penyumbatan pergerakan cacat linier yang disebut dislokasi. Logam, dengan pengecualian logam kaca, adalah bahan kristal. Kebanyakan logam ada dalam salah satu dari tiga bentuk kristal berikut:

1. *Face-centered cubic* (FCC)
2. *Body Centered-cubic* (BCC)
3. *Hexagonal Close Packed* (HCP)



Gambar 2.6 Tiga bentuk kristal pada logam: (a) FCC, (b) BCC, (c) HCP (Chawla, 2013)

Gambar 2.6 menunjukkan ketiga struktur ini. Titik-titik hitam menandai pusat posisi atom, dan beberapa bidang atom ditunjukkan berbayang. Dalam logam asli, atom-atom saling bersentuhan dan semua ruang terisi. Logam adalah bahan kristal; Namun, struktur kristal tidak pernah sempurna. Logam

mengandung berbagai ketidaksempurnaan kristal yang dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Cacat titik (*Point defects*)
2. Cacat garis (*Line defects*)
3. Cacat planar atau antarmuka (*Bidimensional*)
4. Cacat volume (*Tridimensional*)

Cacat titik bisa dari tiga jenis. Kekosongan dibuat ketika posisi atom dalam kisi kristal kosong. Interstitial diproduksi ketika atom material atau atom asing menempati posisi interstitial atau non-kisi. Cacat titik substitusi muncul ketika posisi atom reguler ditempati oleh atom asing. Cacat titik intrinsik (lowongan dan self-interstitials) pada logam ada pada suhu tertentu dalam konsentrasi kesetimbangan. Peningkatan konsentrasi cacat ini dapat dihasilkan dengan pendinginan dari suhu tinggi, membombardir dengan partikel energetik seperti neutron, dan deformasi plastis. Cacat titik dapat memiliki efek yang ditandai pada sifat mekanik.

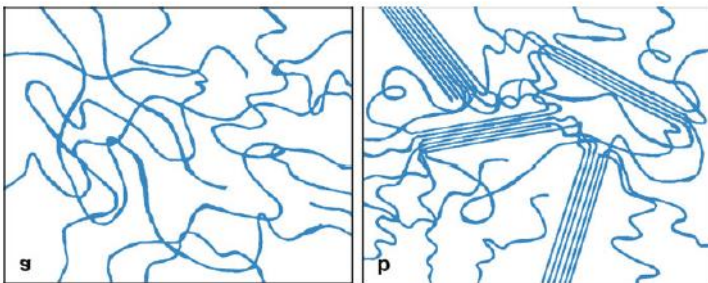
2.2.2 Matriks Polimer

Polimer secara struktural jauh lebih kompleks daripada logam atau keramik. Mereka murah dan dapat dengan mudah diproses. Di sisi lain, polimer memiliki kekuatan dan modulus yang lebih rendah dan batas suhu penggunaan yang lebih rendah. Paparan sinar ultraviolet yang berkepanjangan dan beberapa pelarut dapat menyebabkan degradasi sifat polimer (Chawla, 2013). Karena ikatan kovalen yang dominan, polimer umumnya merupakan konduktor panas dan listrik yang buruk. Namun demikian, polimer umumnya lebih tahan terhadap bahan kimia daripada logam. Secara struktural, polimer adalah molekul mirip rantai raksasa (karenanya makromolekul namanya) dengan atom karbon terikat kovalen yang membentuk tulang punggung rantai. Proses pembentukan molekul besar dari yang kecil disebut polimerisasi; yaitu, polimerisasi adalah proses penyatuan banyak monomer, blok bangunan dasar, bersama untuk membentuk polimer. Ada dua kelas polimerisasi penting:

1. *Polimerisasi Kondensasi*. Dalam proses ini reaksi bertahap molekul terjadi dan pada setiap langkah molekul senyawa sederhana, umumnya air, terbentuk sebagai produk sampingan.
2. *Polimerisasi Adisi*. Dalam proses ini monomer bergabung untuk membentuk polimer tanpa menghasilkan produk sampingan. Penambahan polimerisasi umumnya dilakukan dengan adanya katalis. Penambahan linear molekul etilen ($-\text{CH}_2$) menghasilkan polietilen (rantai molekul etilen), dengan massa akhir polimer menjadi jumlah massa monomer.

2.2.2.1 Termoset dan Termoplastik

Polimer yang melunak atau meleleh pada pemanasan disebut polimer termoplastik dan cocok untuk pembentukan aliran cairan. Contohnya termasuk polietilena densitas rendah dan tinggi, polistirena, dan PMMA. Ketika strukturnya amorf, tidak ada urutan yang jelas di antara molekul-molekul dan rantai-rantai disusun secara acak; lihat Gambar 3.3a. Daerah kristal tunggal kecil seperti platel yang disebut lamellae atau kristalit dapat diperoleh dengan pengendapan polimer dari larutan encer (Chawla, 2013). Dalam *lamellae*, rantai molekul panjang dilipat secara teratur; lihat Gambar. 2.8b. Banyak kristalit dikelompokkan bersama dan membentuk spherulite, seperti butiran logam.

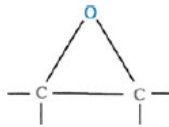


Gambar 2.7 Susunan Molekul Polimer: (a) Amorfus, (b) Semikristalin (Chawla, 2013)

Ketika molekul-molekul dalam polimer saling berhubungan dalam bentuk jaringan, mereka tidak melunak saat dipanaskan. Kami menyebutnya polimer ikatan silang termoseting. Polimer termoset terurai pada pemanasan. Menghubungkan silang membuat molekul sulit melewati satu sama lain, membuat polimer kuat dan kaku. Contoh tipikal adalah karet yang dihubungkan silang dengan belerang, yaitu karet vulkanisir. Karet yang divulkanisir memiliki kekuatan karet alam sepuluh kali lipat. Contoh umum dari polimer termoseting termasuk epoksi, fenolik, poliester, dan vinil ester (Chawla, 2013).

2.2.2.2 Epoksi

Ini adalah salah satu bahan matriks termoset utama. Epoksi adalah polimer yang mengandung gugus epoksida (satu atom oksigen dan dua atom karbon) dalam struktur kimianya; lihat Gambar 2.8. *Diglycidyl ether* dari *bisphenol A* (DGEBA) adalah contohnya. DGEBA, mengandung dua gugus epoksida, adalah cairan organik berbobot molekul rendah. Seringkali, seseorang menggunakan berbagai aditif untuk memodifikasi karakteristik epoxies. Misalnya, pengencer digunakan untuk mengurangi viskositas. Agen pelentur digunakan untuk membuat epoksi fleksibel. Agen lain digunakan untuk perlindungan terhadap radiasi ultraviolet. Zat pengawet adalah senyawa asam amino atau asam organik, dan ikatan silang diperoleh dengan memperkenalkan bahan kimia yang bereaksi dengan gugus epoksi dan hidroksi antara rantai yang berdekatan. Agen penyembuhan umum untuk epoksi DGEBA adalah diethylenetriamine (DETA). Tingkat hubungan silang adalah fungsi dari jumlah bahan pengawet yang ditambahkan. Umumnya, 10–15% berat amina atau asam anhidrida ditambahkan, dan mereka menjadi bagian dari struktur epoksi. Akselerator, jika ditambahkan, dapat mempercepat proses penyembuhan. Secara umum, karakteristik seperti kekakuan, kekuatan, dan suhu transisi gelas meningkat dengan peningkatan cross-linking, tetapi ketangguhan menurun (Chawla, 2013).



Gambar 2.8 Struktur kimia dari grup epoksi (Chawla, 2013)

Resin epoksi lebih mahal daripada poliester, tetapi resin ini memiliki ketahanan kelembaban yang lebih baik, penyusutan yang lebih rendah saat pengeringan (sekitar 3%), suhu penggunaan maksimum yang lebih tinggi, dan adhesi yang baik dengan serat kaca. Banyak formulasi eksklusif epoksi tersedia, dan sebagian besar komposit matriks polimer berkinerja tinggi memiliki epoksi termosetting sebagai matriks.

Reaksi *curing* epoksi dapat diperlambat dengan menurunkan suhu reaksi. Sebuah epoksi sebelum sepenuhnya cross-linked dikatakan berada di tahap B. Di tahap B, epoksi memiliki kelekatan yang khas. Resin B-stage ini digunakan untuk membuat prepreg serat, yang dikirim ke pabrik di mana ia dapat sepenuhnya disembuhkan menjadi padatan keras. Jenis dan tingkat penambahan agen curing akan mengontrol total waktu curing (juga disebut masa simpan atau masa pakai pot). Untuk meningkatkan umur simpan, *prepregs* matriks *cured*-epoksi B-stage diangkut dalam truk berpendingin dan disimpan

dalam penyimpanan berpendingin. Tabel 3.1 memberikan beberapa karakteristik epoksi penting pada suhu kamar. Komposit matriks epoksi pada awalnya diformulasikan untuk menahan layanan berkepanjangan pada 180°C (~ 350°F). Pada tahun 1970-an, diketahui bahwa mereka rentan terhadap efek hygrothermal dan batasan suhu layanan mereka adalah 120°C (250°F).

Tabel 2.1 Sifat dan Karakter dari Epoksi(Chawla, 2013)

Density, ρ (g/cm^3)	Strength, σ (MPa)	Modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν	CTE, α (10^{-6} K^{-1})	Cure shrinkage (%)	Use temp. (°C)
1.2–1.3	50–125	2.5–4	0.2–0.33	50–100	1–5	150

2.2.2.3 Poliester

Resin poliester tak jenuh mengandung sejumlah ikatan rangkap C=C. Reaksi kondensasi antara glikol (etilena, propilena, atau dietilen glikol) dan asam dibasat tak jenuh (maleat atau fumarat) menghasilkan poliester linier yang mengandung ikatan rangkap antara atom karbon tertentu. Istilah tidak jenuh berarti ada situs reaktif dalam molekul. Pengencer seperti styrene digunakan untuk mengurangi viskositas poliester. *Styrene* mengandung ikatan rangkap C=C dan mengikat molekul poliester yang berdekatan pada titik-titik tidak jenuh. Agen pengerasan dan pengawet dan penyerap ultraviolet biasanya ditambahkan. Seringkali, katalis seperti peroksida organik ditambahkan untuk memulai tindakan pengawetan. Seseorang dapat mempercepat proses penyembuhan dengan menaikkan suhu; ini meningkatkan laju dekomposisi katalis. Ini juga dapat dicapai dengan menggunakan akselerator seperti cobalt naphthalate. Poliester tak jenuh memiliki ketahanan yang memadai terhadap air dan berbagai bahan kimia, tahan cuaca, penuaan, dan, yang tak kalah pentingnya, sangat murah. Ini dapat menahan suhu hingga sekitar 80°C dan mudah bergabung dengan serat kaca. Resin poliester menyusut antara 4 dan 8% pada proses curing. Tabel 2.2 memberikan beberapa sifat suhu ruangan penting dari poliester (Chawla, 2013).

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Poliester(Chawla, 2013)

Density, ρ (g/cm^3)	Strength, σ (MPa)	Modulus, E (GPa)	Poisson's ratio, ν	CTE, α (10^{-6}K^{-1})	Cure shrinkage (%)	Use temp. (°C)
1.1–1.4	30–100	2–4	0.2–0.33	50–100	5–12	80

Istilah yang sama digunakan untuk dua polimer yang sangat berbeda. Poliester tak jenuh adalah resin termoset yang biasa digunakan sebagai bahan matriks dalam komposit polimer. Biasa disebut sebagai poliester, sangat berbeda dari poliester termoplastik (lihat di bawah). Seperti ditunjukkan di atas, resin poliester tak jenuh adalah struktur amorf dan diperoleh dengan polimerisasi kondensasi dari asam dibasat tak jenuh dan glikol

(umumnya polipropilen glikol). Untuk digunakan dalam komposit, seseorang mulai dengan resin poliester tak jenuh cairan yang sangat kental. Styrene digunakan untuk mengontrol viskositas resin. Resin mengalami reaksi curing yang melibatkan ikatan silang rantai yang mengarah ke pengerasan. Katalis (biasanya, metil etil keton peroksida, MEKP) digunakan untuk memulai reaksi curing. Termoset yang disembuhkan berbentuk struktur amorf. Polimer termoset ini menemukan kegunaan yang luas dalam produk-produk seperti kapal yang diperkuat serat gelas, pipa, bilik pancuran, dan lain sebagainya.

Ada resin lain yang juga biasa disebut sebagai poliester, tetapi sangat berbeda dari poliester tak jenuh yang dijelaskan di atas. Nama lengkap dari poliester termoplastik ini adalah polietilen tereftalat atau PET (terkadang PETE). Ini adalah salah satu dari tiga komoditas termoplastik utama — PE, PP, dan PET. PET dibuat oleh reaksi esterifikasi antara asam tereftalat dan etilen glikol untuk menghasilkan PET monomer, dengan air sebagai produk samping. Monomer PET dikenai polimerisasi melalui reaksi polikondensasi monomer. Menariknya, etilen glikol adalah produk sampingan dari reaksi ini, yang tentu saja didaur ulang. PET, atau poliester seperti yang biasa disebut, digunakan secara luas untuk membuat serat, film, dan botol untuk air dan soda pop. Variasi botol memiliki berat molekul yang lebih tinggi. PET adalah bahan semikristalin. Serat berbasis PET membentuk sekitar 60% dari pasar sementara botol membentuk 30%. Nama dagang umum dari serat berbasis PET termasuk serat *Tergal*, *Terylene*, dan *Dacron* (Chawla, 2013).

2.3 Penguat (*Reinforcements*)

Penguat tidak harus dalam bentuk serat panjang. Penguat terdapat dalam beberapa bentuk seperti bentuk partikel, serpihan, *whiskers*, serat pendek, serat kontinu, atau lembaran. Ternyata sebagian besar penguat yang digunakan dalam komposit memiliki bentuk berserat karena bahan lebih kuat dan kaku dalam bentuk berserat daripada dalam bentuk lainnya. Perlu digaris bawahi bahwa banyak serat alami dapat

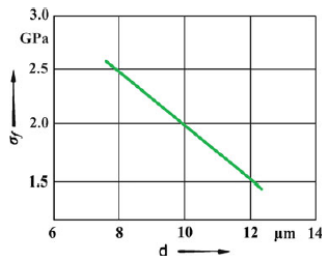
dan digunakan dalam situasi yang melibatkan tekanan yang tidak terlalu tinggi (Chawla 1976; Chawla dan Bastos 1979). Keuntungan besar dalam hal ini, tentu saja, adalah biayanya yang rendah. Serat selulosa dalam bentuk kapas, rami, *flax*, *jute*, *hemp*, dan *sisal*, misalnya, telah digunakan dalam industri tekstil, sedangkan kayu dan jerami telah digunakan dalam industri kertas. Serat alami lainnya, seperti rambut, wol, dan sutra, terdiri dari berbagai bentuk protein. Serat sutra yang diproduksi oleh berbagai laba-laba, khususnya, tampak sangat menarik karena fraktur yang tinggi (Chawla, 2013).

Serat kaca, dalam berbagai bentuknya, telah menjadi penguat paling umum untuk matriks polimer. Serat Aramid, diluncurkan pada 1960-an, jauh lebih kaku dan lebih ringan dari serat kaca. *Kevlar* adalah nama dagang *Du Pont* untuk serat aramid, sedangkan *Twaron* adalah nama dagang serat aramid yang dibuat oleh *Teijin Aramid*. Serat polyethylene gel-spun, yang memiliki kekakuan yang sebanding dengan serat aramid, dikomersialkan pada 1980-an. Serat berkinerja tinggi lainnya yang menggabungkan kekuatan tinggi dengan kekakuan tinggi adalah boron, silikon karbida, karbon, dan alumina. Penggunaan serat sebagai bahan teknis berkinerja tinggi didasarkan pada tiga karakteristik penting (Dresher 1969):

1. Diameter kecil yang berhubungan dengan ukuran butirnya atau unit mikrostruktur lainnya. Ini memungkinkan fraksi yang lebih tinggi dari kekuatan teoretis untuk dicapai daripada yang dimungkinkan dalam bentuk curah. Ini adalah akibat langsung dari efek ukuran yang disebut; semakin kecil ukurannya, semakin rendah kemungkinan memiliki ketidaksempurnaan dalam materi. Gambar 2.9 menunjukkan bahwa kekuatan serat karbon berkurang

dengan meningkatnya diameternya (de Lamotte dan Perry, 1970).

2. Aspek rasio yang tinggi (panjang/diameter, l/d), memungkinkan sebagian besar beban yang diterapkan dipindahkan melalui matriks ke serat yang kaku dan kuat.
3. Tingkat fleksibilitas yang sangat tinggi, yang benar-benar merupakan karakteristik dari bahan yang memiliki modulus atau kekakuan rendah dan diameter kecil. Fleksibilitas ini memungkinkan penggunaan berbagai teknik untuk membuat komposit dengan serat ini.



Gambar 2.9 Grafik hubungan antara kekuatan (σ_f) karbon fiber dengan peningkatan diameter fiber (Chawla, 2013)

2.3.1 Fleksibilitas

Fleksibilitas material yang diberikan, sebagaimana ditunjukkan dalam atribut di atas, adalah fungsi dari kekakuan elastis dan dimensi penampang. Secara intuitif, orang dapat dengan mudah memvisualisasikan bahwa semakin tinggi kekakuan material, maka akan semakin tidak fleksibel. Dapat memperlakukan serat tunggal menjadi balok elastis yang memanjang. Dengan mengasumsikan serat memiliki modulus Young E , dan diameternya d memiliki momen *bending* M , yang akan ditekuk menjadi jari-jari R . Untuk lentur elastis balok seperti

itu, perlu didefinisikan kekakuan lentur (*flexural rigidity*) sebagai MR (Chawla, 2013). Sehingga, untuk balok yang akan diberi tekanan membentuk radius R , dapat dihubungkan dengan persamaan:

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R} \quad (2.17)$$

atau,

$$MR = EI \quad (2.18)$$

dimana E merupakan modulus Young dari material, dan I merupakan momen inersia dari geometri material. Untuk balok atau serat berdiameter d , momen area kedua pada sumbu melalui *centroid* balok diberikan oleh persamaan 2.19 :

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2.19)$$

Sekarang, dapat didefinisikan fleksibilitas serat (yaitu, balok elastis) sebagai *invers* dari kekakuan lentur (*flexural rigidity*). Dengan kata lain, fleksibilitas suatu serat adalah fungsi kebalikan dari modulus elastisitasnya E , dan momen inersia dari penampang melintangnya, I . Modulus elastis suatu material umumnya tidak tergantung pada bentuk atau ukuran dan umumnya merupakan konstanta material untuk komposisi kimia tertentu (dengan asumsi material sepenuhnya padat). Jadi, untuk komposisi dan kerapatan tertentu, fleksibilitas suatu material ditentukan oleh bentuknya, atau lebih tepatnya oleh diameternya. Dengan substitusi persamaan (2.19) ke (2.18), maka didapat:

$$MR = EI = \frac{E\pi d^4}{64} \quad (2.20)$$

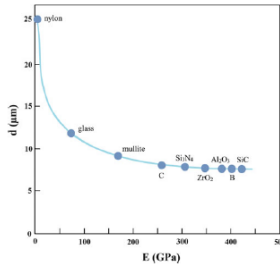
atau, karena fleksibilitas sama dengan $1/MR$, maka persamaan 2.20 dapat dikonversi menjadi persamaan 2.21, dimana:

$$\text{Fleksibilitas} = \frac{1}{MR} = EI = \frac{64}{E\pi d^4} \quad (2.21)$$

dimana d merupakan diameter ekivalen dan I merupakan momen inersia dari *beam* (serat). Persamaan (2.19) mengindikasikan bahwa fleksibilitas, $1/MR$, merupakan persamaan yang sangat sensitif terhadap perubahan diameter d . Implikasi penting dari persamaan (2.19) dapat dijabarkan sebagai berikut:

- Fleksibilitas serat adalah fungsi kebalikan yang sangat sensitif dari diameternya, d .
- Dengan diameter yang cukup kecil, pada prinsipnya memungkinkan untuk menghasilkan serat sefleksibel apapun dari polimer, logam, atau keramik.
- Komposit dapat dibuat dengan serat yang sangat fleksibel dari bahan yang rapuh seperti kaca, silikon karbida, alumina, dan sebagainya, dengan syarat fiber atau serat berdiameter halus, namun perlu diketahui bahwa proses pembentukan serat halus membutuhkan proses yang rumit.

Untuk menggambarkan konsep fleksibilitas ini, perlu dilakukan *plot* diameter berbagai bahan dalam bentuk berserat dengan fleksibilitas $1/MR$ sama dengan filamen yang sangat fleksibel, yaitu, serat nilon berdiameter 25 mm sebagai fungsi dari modulus elastis E . Perhatikan bahwa dengan diberi diameter yang cukup kecil, logam atau keramik mungkin memiliki tingkat fleksibilitas yang sama dengan serat nilon berdiameter 25 mm. Grafik detail terdapat dan dipaparkan pada gambar 2.10 (Chawla, 2013).



Gambar 2.10 Hubungan diameter serat berbagai material dengan Modulus Young (Chawla, 2013)

2.3.2 Serat Kaca (*Glass Fiber*)

Serat kaca adalah nama generik seperti serat karbon atau baja atau aluminium. Sama seperti komposisi berbeda dari baja atau paduan aluminium tersedia, ada banyak komposisi kimia yang berbeda dari serat kaca yang tersedia secara komersial. Gambar 2.11 menunjukkan beberapa bentuk yang umum dimanufakturisasi. Serat gelas yang umum adalah berbasis silika (~50-60% SiO_2) dan mengandung sejumlah oksida lain seperti kalsium, boron, natrium, aluminium, dan besi, misalnya. Tabel 2.3 memberikan komposisi beberapa serat gelas yang biasa digunakan.

Tabel 2.3 Komposisi dari Serat Kaca (Chawla, 2013)

Composition	E glass	C glass	S glass
SiO_2	55.2	65.0	65.0
Al_2O_3	8.0	4.0	25.0
CaO	18.7	14.0	–
MgO	4.6	3.0	10.0
Na_2O	0.3	8.5	0.3
K_2O	0.2	–	–
B_2O_3	7.3	5.0	–

E merupakan kependekan dari *electrical*, merupakan nilai insulator konduktivitas listrik fiber *glass*, C kependekan dari *corossion*, dan C *glass* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap korosi kimiawi dibandingkan jenis serat lainnya, sedangkan S kependekan dari *silica*, dimana kandungan silika yang

tinggi membuat *S glass* memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dibandingkan dengan jenis serat lainnya.

Perlu digaris-bawahi bahwa sebagian besar serat gelas kontinyu yang dihasilkan adalah dari jenis kaca E tetapi, terlepas dari penunjukan E, penggunaan listrik serat gelas E hanya sebagian kecil dari total pasar. Tabel 2.4 menunjukkan sifat-sifat dari beberap jenis serat kaca komersil.

Tabel 2.4 Sifat Mekanik Berbagai Macam Serat Kaca (Chawla, 2013)

Type of glass fiber	Resin	Curing agent	V_f	Testing Standard	Tensile Strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact strength	Interlaminar shear strength (MPa)	Ref.
Woven mat	Polyester	MEKPI/Cobalt naphthalene	0.25	ASTM D412 (T)	1.601	80.5	20.0	–	–	41.850 (J)	–	1
Woven mat	Polyester with 3% oligomeric siloxane	–	0.37	ASTM D-3039 (T), ASTM D 790 (F), ASTM D 2344 (S)	395.8	18000	3.9	399.4	18000	–	44.7	4
Woven mat	Polyester	–	0.33	ASTM D 638-97 (T)	249	6240	–	–	–	–	–	24
Woven mat	Polyester	–	–	2810 E6 (T)	189.0	–	–	–	–	–	–	5
Chopped strand	Polyamide66 (PA66)/poly-phenylene sulfide (PPS) blend	–	0.30	GB/T 16.421–1996 (T), GB/T 16.419–1996 (F), GB/T 16.420–1996 (I)	–	124	–	159	–	98.2 (kJ/m ²)	–	25
Woven mat [70/30]	Isophthalic/neo-pentyl glycol polyester	–	0.42	PS25C-0118 (T)	200	–	–	–	–	10(J)	–	26
Woven mat (Non-symmetric)	Polyester	–	–	362 F (BS, 1997) (T)	220	7000	0.055	–	–	–	–	8
Woven	Polyurethanes	–	0.49	ASTM D3039 (T), ASTM D790 (F), ASTM D2344 (S)	278	18654	–	444	27075	–	27	27
Chopped strand mat	Polyester	–	0.60	ASTM D638 (T)	250	325	0.022	–	–	–	–	9
Woven mat	Polyester (acid resistant resin)	–	–	ASTM D 2344 (S)	–	–	–	–	–	–	30	28
Chopped strand mat	Polyester resin	–	0.015	ASTM E 399 (T)	–	3000	–	16.5	–	–	–	29
Chopped strand + vertical roving	Polyester	–	–	ASTM D 3039 (T), ASTM D 5379 (I)	103.4719	–	–	–	–	37.926 (J)	–	6
Virgin fiber	Polyester	–	–	ASTM D256 (T), ASTM D2240 (I)	64.4	7200	1.8	–	–	645.1 (J/m)	–	30
Glass	Polyester (3 wt% Na-MHPT)	–	0.40	ASTM- D638 (T), ASTM- D790 (F), ASTM- D2254 (I)	130.03	–	–	206.15	–	153.50 (kJ/m ²)	–	31
Chopped strand	Epoxy (5.1 V _f flyash)	Hardener	3.98	ASTM standard	–	–	–	–	–	0.017.6 (J/mm ²)	–	7
Woven (biaxial stitch)	epoxy	–	0.57	ASTM D 2355 (S)	–	–	–	–	–	–	18.2	32

Type of glass fiber	Resin	Curing agent	V_f	Testing Standard	Tensile Strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact strength	Interlaminar shear strength (MPa)	Ref.
Randomly oriented	Epoxy (10 wt% SiC)	–	0.5	ASTM D 3039-76 (T), ASTM D 2356 (I)	179.4	6700	–	297.82	–	1.840(J)	18.99	33
Woven	Epoxy (0.5 wt% MWCNTs)	–	0.73	ASTM D 2344 (S)	–	–	–	–	–	–	41.46	34
Unidirectional	Epoxy	–	0.55	ASTM D3039 (T)	784.98	–	0.032	–	–	–	–	35
Woven	Epoxy (6 wt% jcc)	–	0.60	ASTM D 3039 (T)	311	186.10	3.8	–	–	–	–	23
Woven + (35 wt% short borosilicate)	Epoxy	–	–	–	355	43700	1.65	–	–	–	–	36

2.3.3 Serat Karbon (*Carbon Fiber*)

Karbon adalah elemen yang sangat ringan dengan kerapatan sama dengan 2.268 g/cm³. Karbon dapat ada dalam berbagai

bentuk kristal. Ketertarikan kita di sini adalah pada apa yang disebut struktur grafitik di mana atom karbon disusun dalam bentuk lapisan heksagonal. Bentuk karbon terkenal lainnya adalah struktur intan kovalen di mana atom karbon disusun dalam konfigurasi tiga dimensi dengan sedikit fleksibilitas struktural. Bentuk karbon lainnya adalah *Buckminster Fullerene* (atau bola *Bucky*), dengan komposisi molekul C_{60} atau C_{70} . Satu juga dapat memiliki nanotube karbon, yang tidak lain adalah versi *Buckyballs*.

Karbon dalam bentuk grafitik sangat anisotropik, dengan modulus Young teoritis dalam bidang lapisan sama dengan sekitar 1.000 GPa, sedangkan di sepanjang sumbu c sama dengan sekitar 35 GPa. Struktur grafit (Gbr. 2.14a) memiliki kemasan yang sangat padat di bidang lapisan. Struktur kisi ditampilkan lebih jelas dengan hanya bidang kisi pada Gambar 2.14b. Seperti yang kita ketahui, kekuatan ikatan menentukan modulus suatu material. Dengan demikian, ikatan kekuatan tinggi antara atom karbon dalam bidang lapisan menghasilkan modulus yang sangat tinggi sedangkan ikatan tipe *van der Waals* yang lemah antara lapisan tetangga menghasilkan modulus yang lebih rendah ke arah itu. Akibatnya, hampir semua teknik pemrosesan serat karbon memiliki tujuan untuk memperoleh tingkat orientasi yang disukai dari bidang heksagonal yang sangat tinggi di sepanjang sumbu serat (Chawla, 2013).

Serat karbon dengan modulus sangat tinggi dapat dibuat dengan karbonisasi serat prekursor organik diikuti dengan grafitisasi pada suhu tinggi. Serat prekursor organik, yaitu, bahan baku serat karbon, umumnya serat polimer tekstil khusus yang dapat dikarbonisasi tanpa meleleh. Serat prekursor, seperti serat polimer, terdiri dari molekul rantai panjang ($0.1-1 \mu\text{m}$ ketika memanjang penuh) tersusun secara acak. Serat polimer seperti itu umumnya memiliki sifat mekanik yang buruk dan biasanya menunjukkan deformasi yang agak besar pada tekanan rendah terutama karena rantai polimer tidak dipesan. Serat prekursor yang umum digunakan adalah poliakrilonitril (PAN). Serat prekursor lainnya termasuk rayon dan yang diperoleh dari pitches, polivinil alkohol,

polimida, dan fenolik (Chawla, 2013). Tabel 2.5 menunjukkan sifat mekanik dari beberapa carbon fiber berdasarkan resin dan *hardener* yang digunakan.

Tabel 2.5 Sifat Mekanik Beberapa Jenis Serat Karbon (Chawla, 2013)

Properties	LY 5052	Aradur 5052	EM 500	H 917	EPON 828	TETA 3234
Appearance	Clear liquid	Clear liquid	Clear liquid	Amber liquid	Clear liquid	Clear liquid
Color (Gardner)	≤2	≤4	–	–	I Max.	200
Viscosity at 25° C	1000–1500 cps	40–60 cps	1000–1500 cps	60 cps	1100–1500 cps	25 cps
Density at 25° C	1.17 g/cm ³	0.94 g/cm ³	1.16 g/cm ³	0.96 g/cm ³	1.16 g/cm ³	0.98 g/cm ³
Flash point	≥140° C	≥93° C	–	–	249° C	275° C
Mix ratio (by weight)	100	38	100	25	100	15
Equivalent weight (g/eq.)	146–150	–	180–190	–	185–192	–
Supplier	Huntsman	Huntsman	Lionbond	Lionbond	Momentive	Momentive

2.4 Elastisitas dan Kekuatan Laminat

Sebagian besar struktur komposit dibangun sebagai rakitan pelat dan kulit. Ini karena strukturnya lebih efisien ketika membawa beban membran. Alasan penting lainnya adalah bahwa laminasi tebal sulit diproduksi. Sebagai contoh, perhatikan sebuah balok yang terbuat dari bahan yang homogen dengan kekuatan tarik dan tekan yang dikenai momen lentur (Barbero, 2014). Selanjutnya, perhatikan balok solid penampang persegi (Gambar 2.11), lebar dan kedalaman $2c$ yang sama; dengan area A , inersia I , dan bagian modulus S diekspresikan ke dalam persamaan:

$$A = 4c^2 \quad (2.22)$$

$$I = \frac{4}{3}c^4 \quad (2.23)$$

$$S = I/c = \frac{4}{3}c^3 \quad (2.24)$$

Ketika tegangan pada permukaan *beam* mencapai tegangan kegagalan (*failure stress*) σ_f , momen tekuk (*bending*) per satuan luas adalah:

$$m_u = \frac{M_u}{A} = \frac{S\sigma_u}{A} = \frac{1}{3}c\sigma_u \quad (2.25)$$

Setelah itu, dengan mempertimbangkan tabung kotak *hollow* pada gambar 2.11 dengan dimensi $2c \times 2c$ dan ketebalan dinding $2c \gg t$, sehingga perkiraan perhitungan akan valid mengikuti persamaan berikut:

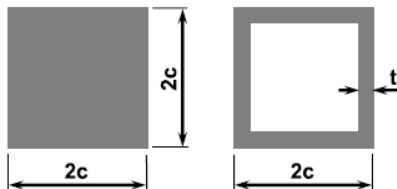
$$A = 4(2c)t = 8ct \quad (2.26)$$

$$I = 2 \left[\frac{t(2c)^3}{12} + c^2(2ct) \right] = \frac{16}{3}tc^3 \quad (2.27)$$

$$S = I/c = \frac{16}{3}tc^2 \quad (2.28)$$

sehingga,

$$m_u = \frac{M_u}{A} = \frac{S\sigma_u}{A} = \frac{\frac{16}{3}tc^2\sigma_u}{8ct} = \frac{2}{3}c\sigma_u \quad (2.29)$$



Gambar 2.11 Penampang melintang *beam*, (a) *solid in-fill*, (b) *hollow square tube* (Barbero, 2014)

Momen kegagalan per satuan luas m_u dua kali lebih besar untuk tabung persegi berlubang dengan dinding tipis (*hollow square tube*) dibandingkan dengan bagian padat (*solid in-fill*). Tentu saja, momen kegagalan dibatasi oleh tekuk dinding tipis. Ini adalah alasan analisis *buckling* sangat penting untuk komposit.

Sebagian besar struktur komposit dirancang di bawah kendala *buckling* karena ketebalannya kecil dan materialnya sangat kuat, jadi biasanya material komposit tidak mengalami kerusakan material seperti pada struktur logam (mis., Tegangan luluh atau *yield stress*) tetapi kegagalan struktural seperti tekuk (*buckling*).

Pelat adalah kasus kerangka tertentu, tidak memiliki kelengkungan awal. Karena itu, hanya kerangka yang akan disebutkan dalam sekuel. Kerangka dimodelkan sebagai struktur dua dimensi karena dua dimensi (panjang dan lebar) jauh lebih besar daripada ketebalan. Koordinat ketebalan dihilangkan dari persamaan yang diatur sehingga masalah 3D disederhanakan menjadi 2D. Dalam prosesnya, ketebalan menjadi parameter yang diketahui dan dipasok ke model analisis.

Pemodelan komposit laminasi berbeda dari pemodelan bahan konvensional dalam tiga aspek. Pertama, persamaan konstitutif dari setiap lamina adalah ortotropik. Kedua, persamaan konstitutif elemen tergantung pada asumsi kinematik dari teori kerangka atau *shell* yang digunakan dan implementasinya ke dalam elemen. Akhirnya, simetri material sama pentingnya dengan simetri geometris dan beban ketika mencoba menggunakan kondisi simetri dalam model.

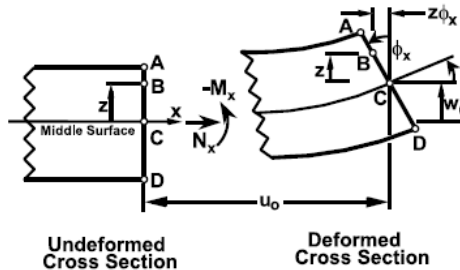
2.4.1 Kinematika Kerangka (*Shells*)

Elemen shell didasarkan pada berbagai teori shell yang pada gilirannya didasarkan pada asumsi kinematik. Artinya, ada beberapa asumsi mendasar tentang kemungkinan jenis deformasi material melalui ketebalan cangkang. Asumsi ini diperlukan untuk mengurangi persamaan yang mengatur 3D ke 2D. Asumsi semacam itu kurang lebih sesuai untuk berbagai situasi, seperti yang dibahas selanjutnya. (Barbero, 2014)

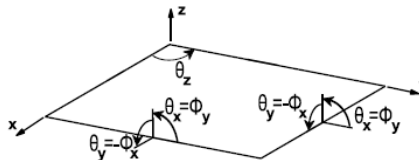
2.4.1.1 Teori *First-order Shear Deformation* (FSDT)

Teori shell komposit paling populer adalah teori deformasi geser urutan pertama (FSDT). Ini didasarkan pada asumsi berikut:

1. Garis lurus yang ditarik melalui ketebalan shell dalam konfigurasi yang tidak tepat dapat berputar tetapi akan tetap lurus ketika shell berubah bentuk. Sudut-sudut yang terbentuk (jika ada) dengan permukaan tengah normal ke yang tidak dilambangkan dilambangkan dengan ϕ_x dan ϕ_y ketika masing-masing diukur dalam bidang $x - z$ dan $y - z$ (Gambar 2.12 dan 2.13).
2. Saat *shell* mengalami deformasi, perubahan ketebalan *shell* dapat diabaikan.



Gambar 2.12 Asumsi deformasi pada FSDT (Barbero, 2014)



Gambar 2.13 Kaidah untuk rotasi plat atau kerangka (*shell*) (Barbero, 2014)

Asumsi ini kemudian diperkuat dan diverifikasi oleh pengamatan eksperimental di sebagian besar kerangka lamina ketika hal berikut ini benar:

- Aspek rasio $r = a/t$, yang didefinisikan sebagai rasio antara dimensi permukaan terpendek a dan ketebalan t , lebih besar dari 10.

- Kekuatan laminasi dalam koordinat cangkang (x ; y ; z) tidak berbeda lebih dari dua kali lipat. Pembatasan ini secara efektif mengesampingkan kulit *sandwich*, di mana inti (*core*) jauh lebih lembut daripada permukaan bidang (*faces*).

Berdasarkan asumsi di atas, perpindahan titik generik B di mana saja di dalam *shell* dapat ditulis dalam hal perpindahan dan rotasi di *midsurface* C dengan persamaan 2.30 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_o(x, y) - z\phi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_o(x, y) - z\phi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w_o(x, y) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Variabel mid-surface di sisi kanan (persamaan 2.30) adalah fungsi dari hanya dua koordinat (x dan y), dengan demikian teori *shell* adalah 2D. Di sisi kiri, perpindahan adalah fungsi tiga koordinat, dan dengan demikian sesuai dengan kondisi dan representasi 3D material. Pada tingkat 3D, digunakan persamaan konstitutif 3D berbentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{14} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

dan persamaan regangan-perpindahan 3D sebagai berikut:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \varepsilon_1 ; 2\varepsilon_{12} = 2\varepsilon_{21} = \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) = \gamma_6 = \varepsilon_6 \quad (2.32)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = \varepsilon_2 ; 2\varepsilon_{13} = 2\varepsilon_{31} = \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) = \gamma_5 = \varepsilon_5 \quad (2.33)$$

$$\epsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \epsilon_3 ; 2\epsilon_{23} = 2\epsilon_{23} = \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) = \gamma_4 = \epsilon_4 \quad (2.34)$$

yang sekarang dapat ditulis dalam bentuk jumlah 2D sebagai:

$$\epsilon_x(x, y, z) = \frac{\partial u_o}{\partial x} - z \frac{\partial \phi_x}{\partial x} = \epsilon_x^0 + z\kappa_x \quad (2.35)$$

$$\epsilon_y(x, y, z) = \frac{\partial u_o}{\partial y} - z \frac{\partial \phi_y}{\partial y} = \epsilon_y^0 + z\kappa_y \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xy}(x, y, z) &= \frac{\partial u_o}{\partial y} + \frac{\partial \phi_x}{\partial x} - z \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \right) \\ &= \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy} \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\gamma_{yz}(x, y) = -\phi_y + \frac{\partial \omega_o}{\partial y} \quad (2.38)$$

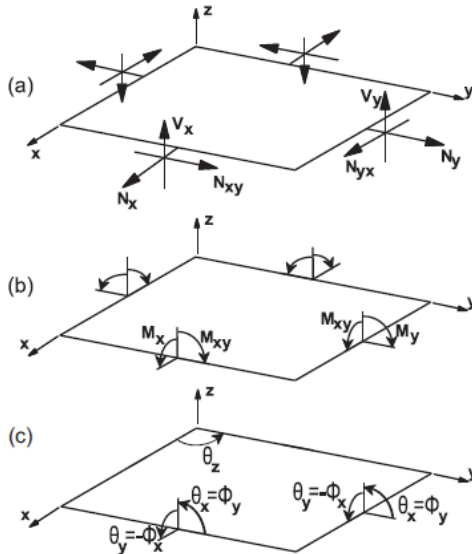
$$\gamma_{xz}(x, y) = -\phi_x + \frac{\partial \omega_o}{\partial x} \quad (2.39)$$

$$\epsilon_z = 0 \quad (2.40)$$

Dimana,

- Strain pertengahan permukaan ϵ_x^0 , ϵ_y^0 , γ_{xy}^0 , juga disebut membran regang, menunjukkan peregangan dan geser bidang tengah pada permukaan.
- Perubahan kelengkungan κ_x , κ_y , κ_{xy} , yang dekat tetapi tidak persis sama dengan kelengkungan geometris dari permukaan-tengah. Variabel yang akan jadi topik untuk Teori *Kirchoff*
- *Strain* geser intralaminar γ_{xz} , γ_{yz} , yang merupakan deformasi geser tebal. Ini kecil tetapi tidak dapat

diabaikan untuk komposit laminasi karena intralaminar geser moduli G_{23} , G_{13} kecil jika dibandingkan dengan modulus dalam bidang E_1 .



Gambar 2.14 Resultan Tegangan pada Elemen Kerangka (Shell):
 (a) Gaya per satuan panjang, (b) momen per satuan panjang, dan
 (c) definisi teori rotasi rangka (*shell*) ϕ dibanding dengan orientasi dalam matematika (Barbero, 2014)

Sementara persamaan konstitutif 3D menghubungkan Regangan dengan tegangan, persamaan konstitutif laminasi menghubungkan tegangan dan kelengkungan di permukaan tengah. Persamaan konstitutif laminasi diperoleh dengan menggunakan definisi resultan tegangan. Sementara dalam elastisitas 3D setiap titik material berada di bawah tegangan, shell dimuat oleh resultan tegangan (Gambar 3.3), yang merupakan bagian integral dari komponen tegangan melalui ketebalan *shell*, sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}^k dz \quad (2.41)$$

$$\begin{Bmatrix} V_y \\ V_x \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix}^k dz \quad (2.42)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}^k z dz \quad (2.43)$$

di mana N adalah jumlah lamina, z_{k-1} dan z_k berturut-turut adalah koordinat di permukaan bawah dan atas pada lamina ke- k . Mengganti persamaan konstitutif 3D versi tegangan bidang dari dalam koordinat lokal shell (1.100 {1.101}) di setiap lamina dan melakukan integrasi, didapat:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\begin{Bmatrix} V_y \\ V_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{45} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.45)$$

Dimana,

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k; \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (2.46)$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \bar{z}_k; \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (2.47)$$

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k \left(t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12} \right); \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (2.48)$$

$$H_{ij} = \frac{5}{4} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij}^*)_k \left[t_k - \frac{4}{t^2} \left(t_k \bar{z}_k^2 + \frac{t_k^3}{12} \right) \right]; \quad i, j = 4, 5 \quad (2.49)$$

di mana $(\bar{Q}_{ij})_k$ adalah koefisien dalam koordinat laminasi matriks tegangan-bidang untuk nomor lamina k , t_k adalah ketebalan lamina k , dan \bar{z}_k adalah koordinat permukaan tengahpada lamina ke- k . Ringkasnya, koefisien A_{ij} mewakili *stiffness* dalam bidang laminasi, koefisien D_{ij} mewakili *bending stiffness*, B_{ij} mewakili kopling ekstensi-*bending*, dan H_{ij} mewakili *stiffness* geser intralaminar. Semua koefisien-koefisien ini dapat dihitung dengan persamaan (2.49) dan diimplementasikan dalam paket perangkat lunak yang tersedia secara luas seperti CADEC dan ANSYS (Barbero, 2014).

2.4.1.2 Teori Kirchhoff

Secara historis, teori *Kirchhoff* lebih disukai karena persamaan yang mengatur dapat ditulis dalam hal hanya satu variabel, deteksi transversal dari kerangka w_0 . Di era pra-informasi, lebih mudah untuk mendapatkan solusi analitis dalam hal hanya satu variabel daripada menghitung tiga variabel yang diperlukan dalam FSDT. Ini menunjukkan bahwa banyak persamaan desain bentuk tertutup dan solusi perkiraan ada dalam manual desain teknik yang didasarkan pada teori *Kirchhoff*. Formula desain sederhana seperti itu masih dapat digunakan untuk desain awal cangkang (*shell*). Persamaan pengatur FSDT dapat direduksi menjadi persamaan pengatur *Kirchhoff*, dan solusi

bentuk tertutup dapat ditemukan dan diturunkan persamaannya (Barbero, 2014).

Dalam teori *Kirchhoff* tentang peregangan geser intralaminar diasumsikan nol (0) atau tidak ada. Dari persamaan (2.38) dan (2.39), dapat ditulis ulang:

$$\phi_x = \frac{\partial \omega_0}{\partial x} \quad (2.50)$$

$$\phi_y = \frac{\partial \omega_0}{\partial y} \quad (2.51)$$

dan disubstitusikan pada persamaan (2.35), (2.36), dan (2.37), maka akan didapat persamaan baru:

$$\epsilon_x(x, y, z) = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \omega_0}{\partial x^2} = \epsilon_x^0 + z\kappa_x \quad (2.52)$$

$$\epsilon_y(x, y, z) = \frac{\partial u_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 \omega_0}{\partial y^2} = \epsilon_y^0 + z\kappa_y \quad (2.53)$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z) = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial \phi_x}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 \omega_0}{\partial x \partial y} = \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy} \quad (2.54)$$

perlu dicatat bahwa variabel $\phi_x \phi_y$ telah dieliminasi dan teori *Kirchhoff* hanya menggunakan tiga variabel $u_0(x, y)$, $v_0(x, y)$, dan $w_0(x, y)$.

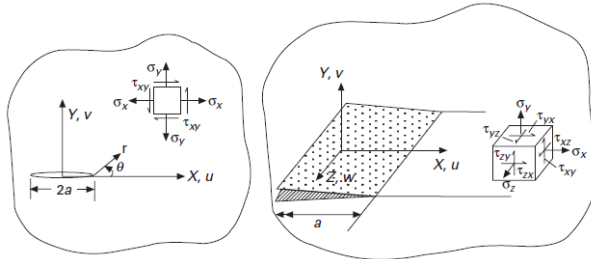
Hal ini membuat penyelesaian analitis menjadi lebih mudah untuk diselesaikan, tapi secara numerik teori *Kirchhoff* lebih kompleks dan sulit untuk diimplementasikan. Karena turunan kedua dari w_0 diperlukan untuk menulis turunan, bentuk lemah dari persamaan (2.55) akan memiliki turunan kedua dari w_0 . Dengan

kata lain, baik perpindahan w_0 dan kemiringan atau gradien dari $\frac{\partial w_0}{\partial x}$, dan $\frac{\partial w_0}{\partial y}$ harus identik pada batas antar elemen bila dihitung dari salah satu elemen yang berbagi batas. persamaan dan konsep seperti ini akan sangat sulit untuk diterapkan (Barbero, 2014).

$$\begin{aligned} \delta W_1 &= \int (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \delta \varepsilon_{zz} + \sigma_{xz} \delta \varepsilon_{xz} \\ &\quad + \sigma_{xy} \delta \varepsilon_{xy} + \sigma_{yz} \delta \varepsilon_{yz}) dV \\ &= \int_V \underline{\sigma}^T \underline{\delta \varepsilon} dV \end{aligned} \quad (2.55)$$

2.5 Konsep Kegagalan Mekanika Material

Mempertimbangkan retakan dalam pelat tak hingga dengan elastisitas linier isotropik homogen seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 (kiri). Retak terletak pada garis $y = 0$ dan di wilayah $x = \pm a$. Diskontinuitas garis ini dengan ketebalan nol dan dengan ujung yang tajam didefinisikan sebagai retakan. Retak juga dapat dianggap sebagai kasus pembatas dari lubang elips dengan sumbu utama $2a$ dan sumbu minor mendekati nilai nol. Di bawah pemuatan eksternal, permukaan retak pada $\theta = \pm \pi$ pada gambar. 2.15 (kiri) dapat saling bergeser satu sama lain. Gambar 2.15 (kanan) menunjukkan retakan pada benda padat yang tak terhingga. Keadaan tegangan dua dan tiga dimensi juga ditunjukkan pada gambar 2.15. Setiap deformasi kompleks dari permukaan retak dapat digambarkan dengan kombinasi tiga mode fraktur, Mode-I, Mode-II, dan Mode-III seperti yang ditunjukkan pada gambar. 2.16. Mode-I mewakili mode pembukaan wajah retak (*interfaces crack*), Mode-II mewakili mode geser, dan Mode-III mewakili mode deformasi *tearing* (robek) (Sridharan, 2008).



Gambar 2.15 Retak dan Orientasi Arah; (kiri) retak pada pelat 2D, dan (kanan) retak pada benda pejal atau padat 3D (Sridharan, 2008)

2.5.1 Crack-tip Stress Field

Bidang tegangan elastis di sekitar ujung retak telah dipelajari dan dijelaskan secara lengkap dan baik serta didokumentasikan dalam monografi penelitian dan buku referensi (lihat Paris dan Sih, 1965; Parker, 1981; Broek, 1982; Ewalds dan Wanhill, 1984; Tada et al., 2000; Sanford, 2003; Anderson 2005). Bidang tegangan di sekitar ujung retak dapat ditulis sebagai (lihat gambar 1.1 (kiri)):

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (2.56)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = & \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ & + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 \right. \\ & \left. - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.58)$$

dengan catatan bahwa $\sigma_z = 0$ untuk bidang tegangan dan $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ untuk kondisi tertentu pada bidang regangan. Kemudian:

$$\tau_z = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.59)$$

$$\tau_{zx} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.60)$$

Tampak dari persamaan (2.56) hingga persamaan (2.60), tegangan tunggal di ujung retak ($r = 0$) dan tekanan memiliki singularitas akar kuadrat. Konstanta K_I , K_{II} , dan K_{III} masing-masing berturut-turut disebut sebagai faktor intensitas-tegangan Mode-I, Mode-II, dan Mode-III. Faktor intensitas-tegangan menggambarkan intensitas medan tegangan dan merupakan ukuran tingkat keparahan retak (Sridharan, 2008).

Perpindahan (u , v) yang sesuai dan setara dengan tekanan pada persamaan (2.56), (2.57), dan (2.58) dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} u = & \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \\ & + \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 \right. \\ & \left. + 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned}
 v = & \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \\
 & + \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 \right. \\
 & \left. - 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{2.62}$$

dan perpindahan di luar bidang (w) mengacu pada mode robek (*tearing*) pada persamaan (2.59) dan (2.60) dapat ditulis ulang menjadi:

$$w = \frac{2K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{2.63}$$

dimana μ merupakan modulus geser (*shear*), $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ untuk bidang tegangan, $\kappa = (3 - 4\nu)$ untuk bidang regangan dan ν merupakan rasio Poisson dari material (Sridharan, 2008).

2.5.2 Laju Pelepasan Energi Regangan

Memanfaatkan tegangan ujung dekat dan bidang perpindahan, Irwin (1957) menghitung usaha (*work*, W) yang diperlukan untuk menutup celah panjang ($a + \Delta a$) ke panjang a . Irwin berpendapat bahwa dalam bahan yang rapuh semua energi yang disuplai secara eksternal digunakan dalam menciptakan permukaan retak baru karena bahan-bahan ini mengalami sedikit atau tidak ada deformasi plastis. Dengan demikian, usaha yang diperlukan untuk memperpanjang retakan dari a ke ($a + \Delta a$) akan sama dengan usaha yang diperlukan untuk menutup retakan dari ($a + \Delta a$) ke a . Karena peningkatan retak kecil, celah membuka perpindahan di belakang ujung retak baru di ($a + \Delta a$) akan sama dengan di belakang ujung retak asli, di a (lihat gambar 2.18)

(Sridharan, 2008). Dengan demikian, besarnya usaha yang diperlukan untuk memperpanjang celah dari a ke $(a + \Delta a)$ adalah:

$$W = \frac{1}{2} \int_0^{\Delta a} \sigma_y (\Delta a - r) \cdot v(r) dr \quad (2.64)$$

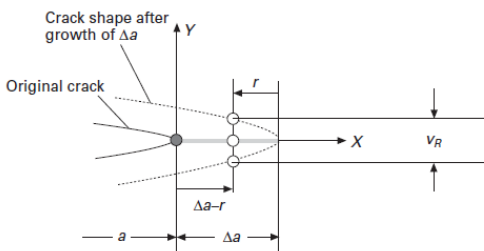
Irwin mendapatkan persamaan untuk menghitung laju pelepasan energi regangan, G , yakni:

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{W}{\Delta a} = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \int_0^{\Delta a} \sigma_y (\Delta a - r) \cdot v(r) dr \quad (2.65)$$

Dengan melakukan integral dan substitusi tegangan pada persamaan (2.56), (2.57), (2.58), (2.59), dan (2.60), serta persamaan perpindahan (*displacements*) (2.61) dan (2.62), maka akan didapat:

$$G = G_I + G_{II} + G_{III} = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + (1 + \nu) \frac{K_{III}^2}{E'} \quad (2.66)$$

dimana G_I , G_{II} , G_{III} merupakan laju pelepasan energi regangan berturut-turut untuk Mode-I, Mode-II, Mode-III. G merupakan total laju pelepasan energi regangan, $E' = E$, pada bidang tegangan, $E' = E / (1 - \nu^2)$, pada regangan, dan E merupakan modulus Young dari material (Sridharan, 2008).



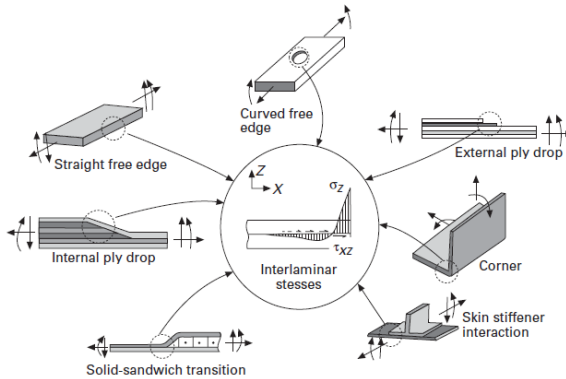
Gambar 2.16 Konsep Retakan Irwin (Sridharan, 2008)

2.6 Delaminasi

Ketika dua atau lebih material digabungkan untuk membentuk material dengan fungsionalitas yang ditingkatkan, material tersebut disebut sebagai material komposit. Bahan komposit biasanya menunjukkan kualitas terbaik dari konstituennya dan kualitas yang tidak dimiliki oleh masing-masing konstituen. Bahan komposit modern menggunakan serat kekuatan tinggi dalam matriks resin. Serat dan matriks digabungkan untuk membentuk lapisan tunggal. Laminasi komposit dibentuk dengan menumpuk lapisan dengan orientasi yang berbeda dengan cara yang telah ditentukan sebelumnya dan menyembuhkan laminasi di bawah suhu dan tekanan tinggi. Karena sifat-sifat dalam arah serat berbeda dari dua arah ortogonal lainnya, lapisan searah (0 derajat) dapat dimodelkan sebagai bahan ortotropik. Sifat material dari lapisan sudut (misalnya, lapisan 45 derajat) dapat diperoleh dengan menggunakan sifat searah, sudut serat, dan transformasi yang sesuai. Sifat material yang dihasilkan dari lapisan sudut menunjukkan perilaku anisotropik (Jones, 1975). Dengan demikian, laminasi komposit dengan lapisan dengan orientasi yang berbeda dapat diperlakukan sebagai media anisotropik berlapis.

Salah satu mode kegagalan paling umum dari struktur komposit adalah delaminasi antar lapisan. Delaminasi adalah celah yang terbentuk di antara lapisan-lapisan yang berdekatan. Lapisan di kedua sisi delaminasi dapat memiliki orientasi serat yang berbeda. Dengan demikian, delaminasi dapat dilihat sebagai celah antarmuka antara dua bahan anisotropik.

Sumber delaminasi yang paling umum adalah diskontinuitas material dan struktural yang menimbulkan tekanan interlaminar. Beberapa sumber ini ditunjukkan pada Gambar. 2.19. Delaminasi terjadi pada tepi bebas stres karena ketidakcocokan sifat lapisan individu, pada lapisan ply (baik internal maupun eksternal) di mana ketebalan harus dikurangi, dan pada daerah yang mengalami lentur di luar bidang tegangan, seperti menekuk balok melengkung. Ketika delaminasi terjadi, ketiga mode kegagalan, mode-I, II, dan III, biasanya hadir (Sridharan, 2008).



Gambar 2.17 Tipe Diskontinuitas Geometri dan Material
(Sridharan, 2008)

Selama 25 tahun terakhir, kemajuan signifikan telah dibuat dalam upaya penelitian untuk memanfaatkan prinsip-prinsip mekanika fraktur untuk mengkarakterisasi dan memprediksi kegagalan kelelahan delaminasi pada laminasi komposit (O'Brien, 1990). Meskipun studi ini telah menunjukkan janji pendekatan ini, mereka juga menyoroti beberapa kesulitan dan perbedaan relatif terhadap penggunaan mekanika fraktur yang mapan untuk penilaian toleransi kerusakan struktur logam. Satu perbedaan penting adalah kecenderungan retakan pada komposit untuk menyebar dalam mode campuran. Aspek ini dapat dikaitkan dengan fakta bahwa delaminasi dibatasi untuk tumbuh di antara lapisan komposit. Retak delaminasi tidak segera berubah ke arah mode pembukaan seperti yang biasanya terjadi pada logam. Perhatian utama adalah kebutuhan untuk mengkarakterisasi dan menganalisis fraktur mode campuran yang melibatkan tiga mode fraktur dasar yang ditunjukkan pada gambar 2.17.

Ketangguhan fraktur interlaminar yang terkait dengan masing-masing mode fraktur harus ditandai dan tingkat pelepasan energi regangan yang sesuai untuk setiap mode (G_I , G_{II} , G_{III}) yang terkait dengan konfigurasi dan pemuatan bunga harus dihitung untuk memprediksi onset dan pertumbuhan delaminasi. Selain itu,

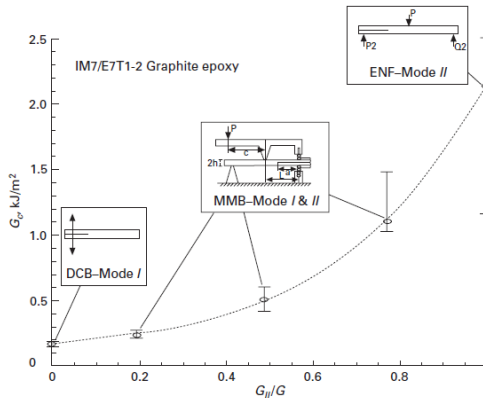
mekanisme kerusakan yang terjadi dalam metode uji standar pada balok komposit searah, seperti menjembatani serat di atas dan di bawah bidang retak dalam mode pembukaan (Johnson dan Mangalgiri, 1987) dan retakan mikro resin antara serat yang bersatu untuk membentuk retasan dalam mode geser (O'Brien, 1998), mempersulit upaya untuk mencapai karakterisasi generik pada pertumbuhan delaminasi (Sridharan, 2008).

2.6.1 Karakterisasi Delaminasi

Alur riset dan penelitian secara analitis dan eksperimental (*state of the arts*) untuk menggunakan mekanika fraktur untuk menghitung ketangguhan fraktur interlaminar dan *onset-growth* delaminasi baru-baru ini diuraikan dalam dua bagian baru yang dikembangkan untuk dimasukkan ke dalam *Composite Materials Handbook 17* (sebelumnya disebut sebagai *Mil Handbook 17*) (Reeder, 2002; Paris, 2002). Sebagaimana dicatat dalam dokumen-dokumen ini, standar American Society for Testing of Material (ASTM) telah dikembangkan untuk Mode I (double cantilever beam, DCB) (ASTM, 2001a) dan Mode-I dan II campuran (mode-campuran lentur, MMB) [ASTM, 2001b] ketangguhan fraktur interlaminar. Meskipun masih belum ada metode standar untuk Mode II dan III murni, dua metode uji yang menjanjikan telah dikembangkan; tes *End Notched Flexure* (ENF) (Russell, 1982; Davidson dan Sun, 2006) untuk Mode II dan uji *Edge Cracked Torsion* (ECT) untuk Mode III (Lee, 1993; Li et al., 1997; Ratcliffe, 2004). Oleh karena itu, standar ASTM untuk ketangguhan retak antarlaminar untuk ketiga mode patah harus segera diterapkan (Sridharan, 2008).

Kriteria kegagalan delaminasi Mode-I dan II campuran tipikal ditunjukkan pada gambar 2.20, dan sisipan pada gambar ini menunjukkan konfigurasi tes DCB, ENF, dan MMB. Ketangguhan fraktur interlaminar ditentukan sebagai nilai kritis dari laju pelepasan energi regangan, G_c , diplot sebagai fungsi dari rasio mode campuran, G_{II} / G . Untuk Mode I murni, G_{II} / G sama dengan nol, sedangkan untuk case Mode II murni, G_{II} / G sama dengan

unity. Ketangguhan meningkat secara monoton ketika G_{II} / G meningkat dari nol menjadi satu, yaitu dari kasus Mode pembukaan murni ke kasus Mode II geser murni. Lebih lanjut, karena mekanisme mikro yang rumit, sebaran sangat besar untuk kasus Mode II (O'Brien, 1998).



Gambar 2.18 Kriteria Delaminasi *Mixed-Mode* (Sridharan, 2008)

Prosedur propagasi delaminasi membutuhkan kriteria propagasi yang didasarkan pada kriteria kegagalan mode campuran. Satu kriteria adalah kriteria hukum pangkat (*power*) yang dikembangkan oleh Wu dan Reuter (1965) yakni:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^m + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^n + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}}\right)^p \geq 1 \quad (2.67)$$

di mana m , n , dan p adalah eksponen yang ditentukan secara empiris untuk kriteria mode campuran. Untuk kasus geometri 2D, hanya dua istilah pertama dalam Persamaan. 2.67 perlu dievaluasi. Jika sisi kiri Persamaan. 2.67 dirubah lebih besar dari atau sama dengan *unity* maka pertumbuhan delaminasi akan terjadi. Wu dan Reuter (1965) menemukan bahwa untuk plat orthotropik dua

dimensi, bentuk empiris dari kriteria fraktur umum ini berlaku ketika $m = 1$ dan $n = 2$.

Kriteria lainnya dikembangkan oleh Benzeggagh dan Kenane (1996) untuk delaminasi 2D dimana:

$$\frac{G_I + G_{II}}{G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left[\frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \right]^m} \geq 1 \quad (2.68)$$

Reeder (2006) memperluas kriteria mode campuran ini menjadi tiga dimensi yang dikembangkan untuk kasus ketika laju pelepasan energi regangan kritis untuk Mode I dan Mode III (masing-masing G_{IIc} dan G_{IIIc}) memiliki nilai yang berbeda. Jika mereka memiliki nilai yang sama, maka mengurangi ke bentuk yang diberikan oleh Benzeggagh dan Kenane (1996). Kriteria Reeder (2006) dinyatakan sebagai:

$$\frac{G_I + G_{II} + G_{III}}{G_{Ic} + \left(\frac{G_{II}(G_{IIc} - G_{Ic}) + G_{III}(G_{IIIc} - G_{Ic})}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right) \left[\frac{G_I + G_{II}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right]^{m-1}} \geq 1 \quad (2.69)$$

Sekali lagi ketika sisi kiri persamaan mengevaluasi lebih besar dari atau sama dengan persatuan, maka pertumbuhan retak akan terjadi. Dalam ekspresi ini, laju pelepasan energi regangan kritis untuk setiap mode fraktur dilambangkan dengan masing-masing G_{Ic} , G_{IIc} , dan G_{IIIc} . G_c adalah total laju pelepasan energi regangan kritis untuk kondisi mode campuran, dan G adalah jumlah dari tiga komponen laju pelepasan energi regangan. Nilai kritis ditentukan melalui pengujian ketangguhan retak.

Untuk dapat mengkarakterisasi delaminasi sepenuhnya, metode karakterisasi kelelahan juga diperlukan. Saat ini, satu-satunya standar ASTM adalah untuk *onset* delaminasi Mode-I (DCB) (ASTM, 1998). Tidak ada standar untuk *onset* delaminasi dalam Mode II, III dan mode campuran. Selain itu, saat ini tidak ada standar untuk karakterisasi pertumbuhan delaminasi. Laju pertumbuhan delaminasi dengan siklus fatik dapat dikarakterisasi

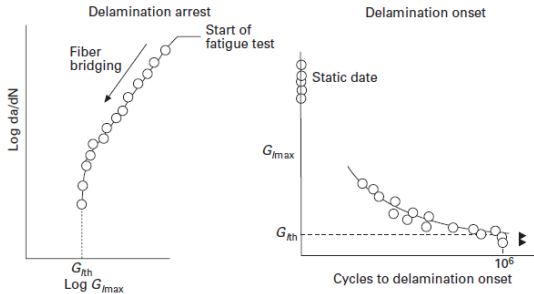
sebagai fungsi dari laju pelepasan energi regangan siklik maksimum yang diterapkan, G_{max} . Ini biasanya digambarkan sebagai plot da/dN vs G_{max} (Prel et al., 1989; Kageyama et al., 1995). Oleh karena itu tingkat pertumbuhan delaminasi dapat dinyatakan sebagai hukum fungsi pangkat (*power-law function*):

$$\frac{da}{dN} = A(G_{max})^n \quad (2.70)$$

Persamaan 1.20 mirip dengan hukum Paris untuk bahan logam. Untuk pertumbuhan delaminasi Mode-I, eksponen untuk komposit dapat bervariasi antara 6 dan 10, yang tinggi dibandingkan dengan untuk bahan logam. Eksponen ini untuk pertumbuhan delaminasi Mode-II dan untuk komposit resin yang dikeraskan mungkin lebih rendah (antara 3 dan 5). Karena nilai eksponen yang besar, perubahan G_{max} yang sangat kecil dapat menyebabkan perubahan besar dalam tingkat pertumbuhan delaminasi, yang membuatnya sulit untuk menetapkan interval inspeksi yang wajar untuk menerapkan toleransi kerusakan klasik, metodologi pertumbuhan retak lambat yang digunakan untuk logam. Karenanya, pendekatan ambang tanpa pertumbuhan sering diusulkan sebagai gantinya (O'Brien, 1990; Martin dan Murri, 1990; O'Brien et al., 1989; Murri dan Martin, 1993). Selain itu, untuk kelelahan Mode I, serat bridging biasanya berkembang dalam spesimen DCB searah (Martin dan Murri, 1990).

Serat yang *bridging* dapat menyebabkan retakan yang tumbuh untuk menangkap secara artifisial awal menghasilkan nilai ambang batas non-konservatif. Oleh karena itu, seperti yang ditunjukkan pada gambar. 2.21, kurva onset G versus N alternatif biasanya dihasilkan untuk mencapai karakterisasi ambang batas untuk onset delaminasi (Martin dan Murri, 1990; O'Brien et al., 1989; Murri dan Martin, 1993; ASTM, 1998). Untuk beberapa aplikasi, pendekatan ambang delaminasi ini mungkin terlalu konservatif. Oleh karena itu, beberapa modifikasi pada hukum Paris klasik telah disarankan, termasuk normalisasi oleh kurva

resistensi statis (kurva-R) (Shivakumar et al., 2006) dan menambahkan istilah tambahan untuk memperhitungkan efek rasio stres (rasio-R) dan *near-threshold non-linearity* (Paris, 2002).



Gambar 2.19 Hasil Eksperimen untuk rentangan G delaminasi onset (Sridharan, 2008)

2.7 Metode Analisis Numerik (*Finite Element Method*)

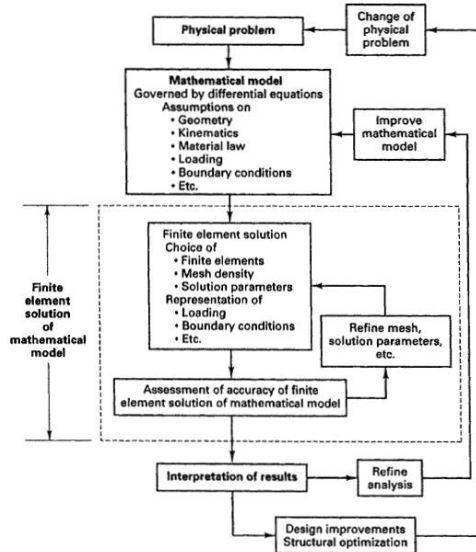
Prosedur elemen hingga saat ini sangat banyak digunakan dalam analisis teknik, dan kita dapat mengharapkan penggunaan ini meningkat secara signifikan di tahun-tahun mendatang. Prosedur ini digunakan secara luas dalam analisis padatan dan struktur dan perpindahan panas dan cairan, dan memang, metode elemen hingga berguna di hampir setiap bidang analisis teknik. Pengembangan metode elemen hingga untuk solusi masalah teknik praktis dimulai dengan munculnya komputer digital. Artinya, esensi dari solusi elemen hingga dari masalah teknik adalah bahwa seperangkat persamaan aljabar yang mengatur didirikan dan dipecahkan, dan hanya melalui penggunaan komputer digital proses ini dapat dianggap efektif dan dapat diterapkan secara umum. Kedua sifat efektifitas dan penerapan umum dalam analisis teknik - melekat dalam teori yang digunakan dan telah dikembangkan pada tingkat tinggi untuk perhitungan praktis, sehingga metode elemen hingga telah menemukan daya tarik yang luas dalam praktik rekayasa (Bathe, 2014).

Metode elemen hingga dalam rekayasa pada awalnya dikembangkan berdasarkan fisik untuk analisis masalah dalam mekanika struktural. Namun, segera diakui bahwa teknik ini dapat

diterapkan dengan baik untuk solusi dari banyak kelas lainnya masalah. Umumnya, prosedur elemen digunakan secara komprehensif dan dalam konteks yang luas untuk padatan dan struktur, masalah lapangan (khususnya perpindahan panas), dan aliran fluida.

Untuk memperkenalkan topik-topik buku ini, kami mempertimbangkan tiga hal penting dalam bagian berikut dari bab ini. Pertama, kita membahas poin penting bahwa dalam analisis apa pun kita selalu memilih model matematika dari masalah fisik, dan kemudian kita memecahkan model itu. Metode elemen hingga digunakan untuk menyelesaikan model matematika yang sangat kompleks, tetapi penting untuk menyadari bahwa solusi elemen hingga tidak pernah dapat memberikan informasi lebih banyak daripada yang terkandung dalam model matematika.

Metode elemen hingga digunakan untuk menyelesaikan masalah fisik dalam analisis dan desain teknik. Gambar 2.22 merangkum proses analisis elemen hingga. Masalah fisik biasanya melibatkan struktur aktual atau komponen struktural yang mengalami beban tertentu. Idealisasi masalah fisik ke model matematika membutuhkan asumsi tertentu yang bersama-sama menyebabkan persamaan diferensial yang mengatur model matematika. Analisis elemen hingga memecahkan model matematika ini. Karena teknik solusi elemen hingga adalah prosedur numerik, maka perlu untuk menilai akurasi solusi. Jika kriteria akurasi tidak terpenuhi, solusi numerik (mis., Elemen hingga) harus diulangi dengan parameter solusi yang disempurnakan (seperti jerat yang lebih halus) hingga akurasi yang cukup tercapai (Bathe, 2014).



Gambar 2.20 Proses dari Analisis Elemen Hingga (Bathe, 2014)

Tujuan umum dalam analisis elemen hingga juga adalah perhitungan estimasi kesalahan, yaitu estimasi seberapa dekat solusi elemen hingga mendekati solusi yang tepat dari solusi model matematika. Perkiraan ini menunjukkan apakah diskritisasi elemen hingga tertentu memang menghasilkan prediksi respons yang akurat, dan seorang perancang kemudian dapat secara rasional memutuskan apakah hasil yang diberikan harus digunakan. Dalam hal hasil yang tidak dapat diterima telah diperoleh, mungkin dengan menggunakan metode elemen hingga yang tidak dapat diandalkan, tentu saja kesulitannya adalah bagaimana mendapatkan hasil yang akurat. Dalam praktiknya, upaya besar dalam analisis elemen hingga seringkali berkaitan dengan pembuatan mesh elemen hingga yang baik. Geometri dibangun dalam preprocessor elemen hingga atau diambil sebagai input ke preprocessor dari paket CAD, seperti NX atau SolidWorks. Beberapa perusahaan besar dengan piranti lunak CAD yang banyak digunakan terdapat pada gambar 2.23. Geometri sederhana dapat

disambungkan secara langsung tetapi seringkali geometri CAD pertama kali dikerjakan untuk menyederhanakan geometri, misalnya untuk menghilangkan fitur kecil seperti lubang kecil, atau untuk mengubah geometri tiga dimensi yang tipis menjadi permukaan dua dimensi dari struktur shell. Hasilnya adalah penelusur geometri untuk analisis, yaitu, diberikan dalam bentuk garis (mendefinisikan permukaan dan volume) yang terkait dengan titik kontrol untuk garis. Geometri ini kemudian disatukan dengan elemen hingga yang ditentukan oleh titik-titik nodal dan derajat kebebasan pada dan di dalam geometri. Alih-alih mendefinisikan elemen dengan cara ini, beberapa penelitian baru-baru ini berfokus pada mendefinisikan elemen hingga dan interpolasi variabel solusi secara langsung oleh fungsi interpolasi CAD yang digunakan untuk mendefinisikan geometri CAD, dengan derajat kebebasan terletak pada titik kontrol CAD. fungsi. Titik kontrol ini sebagian besar tidak terletak pada garis CAD dan biasanya terletak di luar domain fisik yang dipertimbangkan dalam analisis (Bathe, 2014).



(a)



(b)

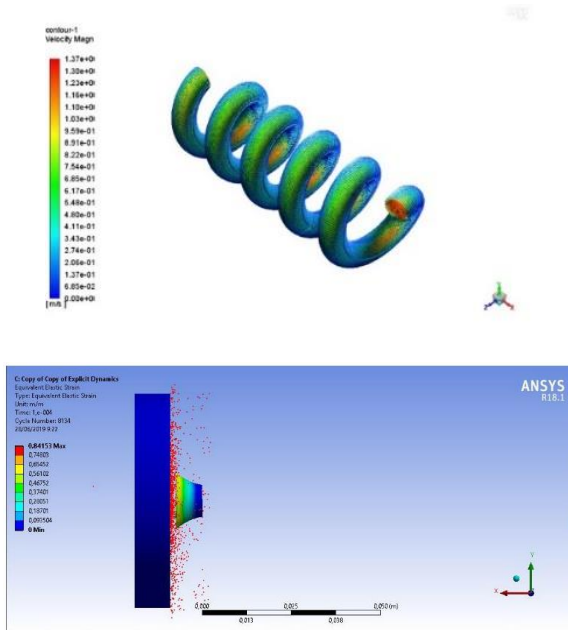


(c)

Gambar 2.21 Perangkat Lunak CAD; (a) SolidWorks, (b) Autodesk Inventor, dan (c) Autodesk AutoCAD (Google *Images*, 2019)

Dalam era modern saat ini, umumnya penyelesaian analisis numerik diselesaikan oleh piranti lunak FEM, dimana produk yang banyak digunakan adalah ANSYS, Abaqus, SimScale, dan lain sebagainya. Karena, penyelesaian analisis numerik melibatkan perhitungan yang kompleks dan panjang, serta melibatkan pengulangan (*iteration*) yang sangat banyak, sehingga penyelesaian analisis numerik menggunakan piranti lunak FEM akan sangat mempermudah para FEA *engineer* untuk dapat menentukan hasil dan kualitas analisis yang bagus dan akurat. Gambar 2.24 menunjukkan beberapa contoh penyelesaian analisis

numerik dengan perbedaan subjek yang diselesaikan oleh piranti lunak FEM.



Gambar 2.22 Analisis numerik menggunakan piranti lunak FEM; (atas) aliran fluida pada *spiral tube* (SciVenue, 2015), (bawah) fragmentasi amunisi *frangible* (Holly, 2019)

Bila diperdalam, topik analisis numerik terbagi menjadi dua golongan utama, yakni analisis dikrit dengan matematika diskrit, dan analisis kontinum dengan mekanika kontinum. Analisis suatu sistem teknik memerlukan idealisasi sistem ke dalam bentuk yang dapat diselesaikan, perumusan model matematika, solusi model ini, dan interpretasi hasil. Dalam penyelesaian menggunakan metode elemen hingga, umumnya digunakan beberapa teknik klasik yang banyak digunakan untuk perumusan dan solusi model matematika dari sistem rekayasa. Dua kategori

model matematika dipertimbangkan: model parameter terpusat dan model berbasis mekanika kontinum. Dua teori yang banyak digunakan secara luas dalam metode elemen hingga disebut sebagai model matematika "sistem diskrit" dan "sistem kontinu".

Untuk model matematika berbasis mekanika kontinum, perumusan persamaan yang mengatur dicapai seperti untuk model parameter yang disamakan, tetapi alih-alih seperangkat persamaan aljabar untuk variabel status yang tidak diketahui, persamaan diferensial mengatur respons. Solusi tepat dari persamaan diferensial yang memenuhi semua kondisi batas hanya mungkin untuk model matematika yang relatif sederhana, dan prosedur numerik harus secara umum digunakan. Prosedur-prosedur ini, pada dasarnya, mengurangi model matematika sistem kontinu menjadi idealisasi tersendiri yang dapat diselesaikan dengan cara yang sama seperti model parameter terpusat. Dalam bab ini kami merangkum beberapa prosedur klasik penting yang digunakan untuk mengurangi model matematika sistem kontinu menjadi model numerik lumpedparameter dan secara singkat menunjukkan bagaimana prosedur klasik ini memberikan dasar untuk metode elemen hingga modern.

Dalam praktiknya, analis harus memutuskan apakah suatu sistem teknik harus diwakili oleh *lumped-parameter* atau model matematika sistem kontinu dan harus memilih semua spesifikasi model. Selanjutnya, jika model matematika tertentu dipilih, analis harus memutuskan bagaimana menyelesaikan secara numerik untuk respons. Di sinilah banyak nilai prosedur elemen hingga dapat ditemukan; yaitu, teknik elemen hingga yang digunakan bersama dengan komputer digital telah memungkinkan solusi numerik dari model matematika sistem kontinu secara sistematis dan sebagai akibatnya memungkinkan perluasan praktis dan penerapan prosedur klasik yang disajikan dalam bab ini ke sistem teknik yang sangat kompleks (Bathe, 2014).

2.7.1 Model Matematika Sistem Diskret

Inti dari model matematika sistem diskret atau *lumped-parameter* adalah bahwa keadaan sistem dapat dijelaskan secara langsung dengan presisi yang memadai dengan besarnya sejumlah variabel keadaan terbatas (dan biasanya kecil). Solusinya memerlukan langkah-langkah berikut:

1. Idealisasi sistem: sistem aktual diidealkan sebagai kumpulan elemen
2. Penyetaraan elemen: persyaratan kesetimbangan masing-masing elemen ditetapkan dalam variabel keadaan
3. Penyusunan elemen: persyaratan interkoneksi elemen dipanggil untuk membuat satu set persamaan simultan untuk variabel status tidak dikenal
4. Perhitungan respons: persamaan simultan diselesaikan untuk variabel keadaan, dan menggunakan persyaratan keseimbangan elemen, respons setiap elemen dihitung.

Langkah-langkah solusi ini diikuti dalam analisis berbagai jenis masalah yang kami pertimbangkan: masalah tunak, masalah propagasi, dan masalah nilai eigen. Tujuan dalam bagian ini adalah untuk memberikan pengantar yang menunjukkan bagaimana masalah di bidang-bidang tertentu dianalisis dan untuk secara singkat membahas sifat dari solusi. Harus disadari bahwa tidak semua jenis masalah analisis dalam rekayasa dipertimbangkan; Namun, sebagian besar masalah memang jatuh secara alami ke dalam area masalah ini. Dalam contoh di bagian ini kami mempertimbangkan masalah struktural, listrik, aliran fluida, dan perpindahan panas, dan kami menekankan bahwa dalam masing-masing analisis ini langkah-langkah dasar solusi yang sama diikuti (Bathe, 2014).

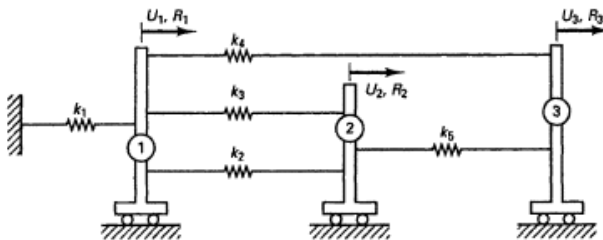
2.7.1.1 Model *Steady-State*

Karakteristik utama dari masalah *steady-state* adalah bahwa respons sistem tidak berubah seiring waktu. Dengan demikian, variabel keadaan yang mendeskripsikan respons sistem

yang sedang dipertimbangkan dapat diperoleh dari solusi seperangkat persamaan yang tidak melibatkan waktu sebagai variabel (Bathe, 2014). Dalam contoh-contoh berikut, kami diilustrasikan prosedur analisis dalam penyelesaian beberapa masalah. Empat masalah sampel diantaranya:

1. Sistem pegas elastis
2. Sistem transfer panas (kalor)
3. Jaringan hidrolik
4. Sistem pegas elastis nonlinear

Analisis ini menunjukkan prosedur analisis umum: pemilihan variabel status tidak dikenal yang mengkarakterisasi respons sistem yang sedang dipertimbangkan, identifikasi elemen yang bersama-sama terdiri dari sistem lengkap, pembentukan persyaratan keseimbangan elemen, dan akhirnya kumpulan elemen dengan menerapkan persyaratan kontinuitas antar elemen.



Gambar 2.23 Model Contoh - Gerobak; Analisis pegas dan batang (*beam*) pada gerobak dalam sistem model matematika diskret (Bathe, 2014)

Beberapa pengamatan harus dilakukan. Pertama, kita perlu dikenali bahwa ada beberapa pilihan dalam pemilihan variabel status. Misalnya, dalam analisis gerobak (Gambar 2.23), perlu dilakukan seleksi gaya yang tidak dikenal di pegas sebagai variabel keadaan. Pengamatan kedua adalah bahwa persamaan dari mana variabel-variabel keadaan dihitung dapat berupa persamaan linear

atau nonlinier dan matriks koefisien dapat bersifat umum. Namun, yang paling diinginkan untuk berurusan dengan matriks koefisien pasti positif simetris karena dalam kasus seperti itu solusi persamaan secara numerik sangat efektif.

Secara umum, karakteristik fisik dari suatu masalah menentukan apakah solusi numerik benar-benar dapat dilemparkan dalam bentuk yang mengarah ke matriks koefisien pasti positif simetris. Namun, bahkan jika mungkin, matriks koefisien pasti positif diperoleh hanya jika variabel solusi yang tepat dipilih, dan dalam analisis nonlinier linierisasi yang tepat harus dilakukan dalam solusi iteratif. Untuk alasan ini, dalam praktiknya, penting untuk menggunakan formulasi umum untuk seluruh kelas masalah bahwa untuk setiap analisis mengarah pada simetris dan matriks koefisien pasti positif. Penggunaan pendekatan langsung untuk merakit persamaan keseimbangan yang mengatur sistem. Poin penting adalah bahwa persamaan kesetimbangan yang mengatur untuk variabel keadaan dapat dalam banyak analisis juga diperoleh dengan menggunakan nilai ekstrem, atau formulasi variasional (Bathe, 2014). Masalah ekstrem terdiri dari penempatan set nilai (variabel keadaan), dimana:

$$U_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.71)$$

untuk setiap fungsi yang diberikan $\Pi(U_1, U_2, \dots, U_n)$ bernilai maksimum, minimum, atau berada pada titik balik. Kondisi tersebut bisa didekati dengan persamaan yang menyatakan variabel, dimana:

$$\delta \Pi = 0 \quad (2.72)$$

dan karena,

$$\delta \Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial U_1} \delta U_1 + \dots + \frac{\partial \Pi}{\partial U_n} \delta U_n \quad (2.73)$$

sehingga,

$$\frac{\partial \Pi}{\partial U_i} = 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, n \quad (2.74)$$

Dari sini perlu dicatat bahwasannya δU_i merupakan “variasi dalam variabel keadaan U_i ; yang mutlak kecuali bahwa mereka harus nol pada dan sesuai dengan pernyataan kondisi pada batas variabel” (Bathe, 2014).

2.7.1.2 Model Propagasi

Karakteristik utama dari masalah propagasi atau dinamis adalah bahwa respons sistem yang sedang dipertimbangkan berubah seiring waktu. Untuk analisis suatu sistem, pada prinsipnya, prosedur yang sama seperti dalam analisis masalah mapan digunakan, tetapi sekarang variabel keadaan dan hubungan elemen keseimbangan tergantung pada waktu. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menghitung variabel status untuk semua waktu t . Sebelum membahas masalah propagasi aktual, mari kita perhatikan kasus di mana efek waktu pada hubungan elemen keseimbangan diabaikan tetapi vektor beban adalah fungsi waktu. Dalam hal ini respons sistem diperoleh dengan menggunakan persamaan yang mengatur respons *steadystate* tetapi mengganti beban yang bergantung waktu atau vektor pemaksa untuk vektor beban yang digunakan dalam analisis *steady-state*. Karena analisis semacam itu pada dasarnya masih merupakan analisis kondisi tunak, tetapi dengan kondisi tunak dipertimbangkan setiap saat, analisis tersebut dapat disebut sebagai analisis kondisi tunak semu (Bathe, 2014).

Dalam masalah propagasi aktual, hubungan elemen keseimbangan adalah *timedependent*, dan ini bertanggung jawab atas perbedaan besar dalam karakteristik respon bila dibandingkan dengan masalah *steady-state*. Berdasarkan argumen dan pengamatan sebelumnya, tampak bahwa kita dapat menyimpulkan bahwa analisis masalah propagasi merupakan perluasan yang sangat sederhana dari analisis masalah kondisi-mapan yang sesuai. Namun, kami mengasumsikan dalam diskusi sebelumnya bahwa sistem diskrit diberikan dan dengan demikian derajat kebebasan

atau variabel negara dapat diidentifikasi secara langsung. Dalam praktiknya, pemilihan sistem diskrit yang sesuai yang berisi semua karakteristik penting dari sistem fisik aktual biasanya tidak langsung, dan secara umum model diskrit yang berbeda harus dipilih untuk prediksi respons dinamis daripada yang dipilih untuk analisis kondisi tunak.

Namun, diskusi menggambarkan bahwa setelah model diskrit telah dipilih untuk masalah propagasi, perumusan persamaan kesetimbangan yang mengatur dapat dilanjutkan dengan cara yang sama seperti dalam analisis respon kondisi-mapan, kecuali bahwa beban inersia dihasilkan yang bertindak pada sistem sebagai tambahan terhadap beban yang diterapkan secara eksternal. Pengamatan ini mengarahkan kita untuk mengantisipasi bahwa prosedur untuk menyelesaikan persamaan keseimbangan dinamis sistem sebagian besar didasarkan pada teknik yang digunakan untuk solusi persamaan kesetimbangan *steady-state* (Bathe, 2014).

2.7.1.3 Model *Eigenvalue*

Dalam diskusi kami sebelumnya tentang kondisi tunak dan masalah propagasi, kami menyiratkan adanya solusi unik untuk respons sistem. Karakteristik utama dari masalah nilai eigen adalah bahwa tidak ada solusi unik untuk respons sistem, dan tujuan analisis adalah untuk menghitung berbagai solusi yang mungkin. Masalah nilai eigen muncul baik dalam analisis *steady-state* dan dinamis (Bathe, 2014).

Berbagai masalah nilai eigen yang berbeda dapat dirumuskan dalam analisis teknik. Dalam subbab ini akan dibahas terutama berkaitan dengan masalah nilai eigen umum dengan bentuk:

$$Av = \lambda Bv \quad (2.75)$$

dimana A dan B merupakan matriks, λ merupakan skalar, dan v merupakan vektor. Jika λ_i dan v_i memenuhi persamaan (2.73).

Kedua variabel tersebut berturut-turut disebut dengan *eigenvalue* dan *eigenvector*.

2.7.2 Model Matematika Sistem Kontinu

Langkah-langkah dasar dalam solusi model matematika sistem kontinu sangat mirip dengan yang digunakan dalam solusi model parameter terpusat. Namun, alih-alih berurusan dengan elemen diskrit, kami memusatkan perhatian pada elemen diferensial tipikal dengan tujuan memperoleh persamaan diferensial yang mengekspresikan persyaratan keseimbangan elemen, hubungan konstitutif, dan persyaratan interkoneksi elemen. Persamaan diferensial ini harus diketahui di seluruh domain sistem, dan sebelum solusi dapat dihitung, mereka harus menghitungnya. harus dilengkapi dengan kondisi batas dan, dalam analisis dinamis, juga oleh kondisi awal.

Seperti dalam solusi model diskrit, dua pendekatan yang berbeda dapat diikuti untuk menghasilkan persamaan diferensial yang mengatur sistem: metode langsung dan metode variasional. Pada subbab ini akan dibahas kedua pendekatan (lihat juga R. Courant dan D. Hilbert [A]) dan menggambarkan prosedur variasional dalam beberapa detail karena, pendekatan ini dapat dianggap sebagai dasar yang terbatas. metode elemen (Bathe, 2014).

2.7.2.1 Formulasi Diferensial

Dalam formulasi diferensial, kami menetapkan persyaratan keseimbangan dan konstitutif dari elemen diferensial tipikal dalam hal variabel keadaan. Pertimbangan ini mengarah pada sistem persamaan diferensial dalam variabel keadaan, dan ada kemungkinan bahwa semua persyaratan kompatibilitas (yaitu, persyaratan interkoneksi elemen diferensial) sudah terkandung dalam persamaan diferensial ini (misalnya, dengan fakta bahwa solusi harus berkelanjutan). Namun, secara umum, persamaan harus ditambah dengan persamaan diferensial tambahan yang memberikan batasan yang sesuai pada variabel keadaan agar semua

persyaratan kompatibilitas dipenuhi. Akhirnya, untuk menyelesaikan perumusan masalah, semua kondisi batas, dan dalam analisis dinamis, kondisi awal dinyatakan.

Untuk keperluan analisis matematis, perlu mengklasifikasikan persamaan diferensial yang mengatur masalah (Bathe, 2014). Dengan mempertimbangkan persamaan diferensial parsial umum orde kedua di domain x dan y , dimana:

$$A(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2B(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C(x, y) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \phi \left(x, y, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.76)$$

dimana u merupakan variabel yang tidak diketahui. Berdasarkan pada koefisien pada persamaan (2.74) persamaan turunan tersebut merupakan persamaan elips, parabola, dan hiperbola dengan syarat:

$$B^2 - AC = \begin{cases} < 0 & \text{elips} \\ = 0 & \text{parabola} \\ > 0 & \text{hiperbola} \end{cases}$$

Klasifikasi ini ditetapkan ketika penyelesaian (2.74) menggunakan metode karakteristik karena kemudian diamati bahwa karakter dari solusi berbeda nyata untuk tiga kategori persamaan. Perbedaan-perbedaan ini juga jelas ketika persamaan diferensial diidentifikasi dengan masalah fisik yang berbeda yang mereka atur. Dalam bentuknya yang paling sederhana, ketiga jenis persamaan dapat diidentifikasi dengan persamaan *Laplace*, persamaan konduksi panas, dan persamaan gelombang (Bathe, 2014).

2.7.2.2 Formulasi Variasi

Pendekatan variasional untuk menetapkan persamaan keseimbangan yang mengatur sistem sudah diperkenalkan sebagai alternatif untuk pendekatan langsung ketika kami membahas analisis sistem diskrit. Seperti dijelaskan, esensi dari pendekatan ini adalah untuk menghitung total potensial Π dari sistem dan untuk mengejar stasioneritas dari Π , misal $\delta \Pi = 0$, sehubungan

dengan variabel keadaan. Kami menunjukkan bahwa teknik variasional dapat efektif dalam analisis sistem diskrit; Namun, sekarang kita akan mengamati bahwa pendekatan variasional menyediakan mekanisme yang sangat kuat untuk analisis sistem kontinu. Alasan utama untuk keefektifan ini terletak pada cara di mana beberapa kondisi batas (yaitu, kondisi batas alami yang didefinisikan di bawah) dapat dihasilkan dan diperhitungkan ketika menggunakan pendekatan variasional.

Total potensi Π juga disebut fungsional dari model permasalahan. Asumsikan bahwa dalam fungsional turunan tertinggi dari variabel keadaan (berkenaan dengan koordinat ruang) berurutan m ; mis., operator mengandung paling banyak turunan urutan ke- m . Kami menyebut masalah semacam itu sebagai masalah variasional C^{m-1} . Mempertimbangkan kondisi batas masalah, kami mengidentifikasi dua kelas kondisi batas, yang disebut dasar (*essentials*) dan kondisi batas alami (*natural boundary-conditions*).

Kondisi batas esensial juga disebut kondisi batas geometris karena dalam mekanika struktural syarat batas esensial sesuai dengan yang ditentukan perpindahan dan rotasi. Urutan turunan dalam kondisi batas esensial adalah, dalam masalah C^{m-1} , paling banyak $(m - 1)$.

Penggolongan kedua dari kondisi batas, yaitu, kondisi batas alami, juga disebut kondisi batas gaya karena dalam mekanika struktural kondisi batas alami berhubungan dengan gaya dan momen batas yang ditentukan. Derivatif tertinggi dalam kondisi batas ini adalah dari m hingga $(2m - 1)$ (Bathe, 2014).

Dalam formulasi variasional, dalam penurunannya akan digunakan simbol variasional δ , yang sudah secara singkat digunakan pada persamaan (2.70) dan sesudahnya. Mari kita ingat beberapa sifat operasional penting dari simbol ini; untuk lebih jelasnya, lihat, misalnya, R. Courant dan D. Hilbert [A]. Asumsikan bahwa fungsi F untuk nilai x yang diberikan tergantung ada v (variabel keadaan), variasi pertama dari F dapat dituliskan dan didefinisikan sebagai:

$$\delta F = \frac{\partial F}{\partial v} \delta v + \frac{\partial F}{\partial (dv/dx)} \delta \left(\frac{dv}{dx} \right) + \dots + \frac{\partial F}{\partial (d^p v/dx^p)} \delta \left(\frac{d^p v}{dx^p} \right) \quad (2.77)$$

Ungkapan persamaan ini dijelaskan sebagai berikut. Diasosiasikan dengan $v(x)$ fungsi $\epsilon \eta(x)$ di mana ϵ adalah konstanta (independen dari x) dan $\eta(x)$ adalah fungsi arbitrer tapi cukup halus yang nol pada dan sesuai dengan kondisi batas esensial. Kita menyebut $\eta(x)$ variasi dalam v , yaitu $\eta(x) = \delta v(x)$ [dan tentu saja $\epsilon \eta(x)$ kemudian juga merupakan variasi dalam v] dan juga untuk turunan yang diperlukan seperti:

$$\frac{d^n \eta}{dx^n} = \frac{d^n \delta v}{dx^n} = \delta \left(\frac{d^n v}{dx^n} \right) \quad (2.78)$$

bahwa, turunan variasi dari v sama dengan turunan variasi pada v . Persamaan (2.75) kemudian diikuti dengan evaluasi bahwa:

$$\delta F = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{F \left[v + \epsilon \eta, \frac{d(v + \epsilon \eta)}{dx}, \dots, \frac{d^p(v + \epsilon \eta)}{dx^p} \right] - F \left(v, \frac{dv}{dx}, \dots, \frac{d^p v}{dx^p} \right)}{\epsilon} \quad (2.79)$$

Mempertimbangkan persamaan (2.75) perlu diperhatikan bahwa ekspresi untuk δF terlihat seperti ekspresi untuk diferensial diferensial total; yaitu, operator variasi δ bertindak seperti operator diferensial sehubungan dengan variabel $v, dv/dx, \dots, d^p v/dx^p$. Persamaan ini dapat diperluas ke beberapa fungsi dan variabel keadaan, dan kami menemukan bahwa hukum variasi penjumlahan, produk, dan sebagainya, sepenuhnya analog dengan hukum diferensiasi yang sesuai (Bathe, 2014). Sebagai contoh, misalkan F dan Q menjadi dua fungsi yang mungkin bergantung pada variabel keadaan yang berbeda; kemudian:

$$\delta(F + Q) = \delta F + \delta Q \quad (2.80)$$

$$\delta(FQ) = (\delta F)Q + F(\delta Q) \quad (2.81)$$

$$\delta(F)^n = n(F)^{(n-1)} \delta F \quad (2.82)$$

Dalam aplikasi kami fungsi biasanya muncul dalam tanda integral; jadi, misalnya, kami juga menggunakan:

$$\delta \int F(x) dx = \int \delta F(x) dx \quad (2.83)$$

diterapkannya aturan ini secara luas dalam derivasi variasional dan akan menggunakan satu kondisi penting (yang sesuai dengan sifat η , yang dinyatakan sebelumnya), yaitu, bahwa variasi variabel keadaan dan turunannya ($m - 1$) harus nol pada dan sesuai dengan kondisi batas esensial, tetapi jika tidak variasi dapat berubah-ubah (Bathe, 2014).

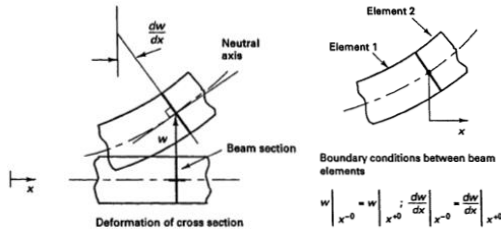
2.8 Formulasi Elemen Struktur

Konsep geometri dan interpolasi perpindahan yang telah digunakan dalam perumusan elemen kontinum dua dan tiga dimensi juga dapat digunakan dalam evaluasi matriks elemen struktur balok, pelat, dan cangkang. Namun, sedangkan dalam perumusan elemen kontinum perpindahan u, v, w (manapun yang berlaku) diinterpolasi dalam hal perpindahan titik nodal dari jenis yang sama, dalam perumusan elemen struktural, perpindahan u, v, w diinterpolasi dalam hal perpindahan dan rotasi midsurface. Akan ditunjukkan bahwa prosedur ini pada dasarnya sesuai dengan formulasi elemen isoparametrik kontinum dengan kendala perpindahan. Selain itu, tentu saja ada asumsi utama bahwa tekanan normal pada wajah bagian tengah adalah nol. Elemen-elemen struktural karena alasan-alasan ini secara tepat disebut elemen isoparametri degenerat, tetapi seringkali kita masih menyebutnya sebagai elemen isoparametrik. Dasar dari metode ini adalah teori yang mencakup efek deformasi geser. Dalam teori ini perpindahan dan rotasi normals wajah tengah adalah variabel

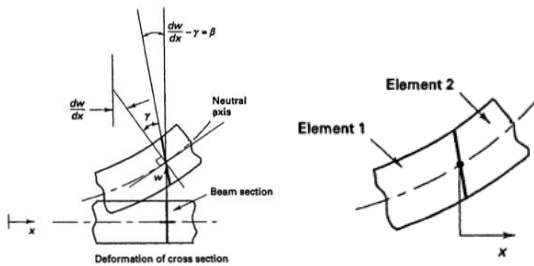
independen, dan kondisi kontinuitas antar pada jumlah ini dapat dipenuhi secara langsung, seperti dalam analisis kontinu. Selain itu, jika konsep interpolasi isoparametrik digunakan, geometri permukaan cangkang melengkung diinterpolasi dan dapat direpresentasikan ke tingkat akurasi yang tinggi. Pada bagian-bagian berikut, akan dibahas terlebih dahulu perumusan elemen cangkang dan cangkang simetri, di mana kita dapat menunjukkan secara rinci prinsip-prinsip dasar yang digunakan, dan kemudian kita mempresentasikan formulasi elemen cangkang dan cangkang umum (Bathe, 2014).

2.8.1 *Beam* dan Rangka Asimetrik Elemen

Mari kita bahas terlebih dahulu beberapa asumsi dasar yang berkaitan dengan perumusan elemen balok. Asumsi dasar dalam analisis lentur balok tidak termasuk deformasi geser adalah bahwa normal pada permukaan tengah (sumbu netral) balok tetap lurus selama deformasi dan bahwa rotasi sudutnya sama dengan kemiringan permukaan balok tengah. Asumsi kinematik ini, diilustrasikan pada gambar 2.25 sesuai dengan teori balok Bernoulli dan mengarah ke persamaan diferensial pengatur berkas-lentur yang terkenal di mana perpindahan melintang w adalah satu-satunya variabel. Oleh karena itu, dengan menggunakan elemen balok yang diformulasikan dengan teori ini, countinuity perpindahan antar elemen mensyaratkan bahwa tongkat dw/dx harus kontinu (Bathe, 2014).



Gambar 2.24 Deformasi *beam* tanpa efek geser (*shear*) (Bathe, 2014)



Gambar 2.25 Deformasi *beam* dengan efek geser (*shear*) (Bathe, 2014)

Mempertimbangkan analisis balok lentur dengan efek deformasi geser, kami mempertahankan asumsi bahwa bagian bidang yang normal terhadap sumbu netral tetap bidang, tetapi karena deformasi geser, bagian ini tidak tetap normal pada sumbu netral. Seperti diilustrasikan pada gambar 2.26, rotasi total pesawat yang semula normal ke sumbu netral balok diberikan oleh rotasi tangen ke sumbu netral dan deformasi geser,

$$\beta = \frac{dw}{dx} = -\gamma \quad (2.84)$$

dimana γ merupakan konstanta untuk regangan geser disepanjang potongan melintang. Asumsi kinematik ini sesuai dengan teori balok *Timoshenko*. Karena tegangan geser aktual dan regangan

bervariasi pada bagian tersebut, regangan geser γ pada persamaan (2.82) adalah regangan konstan yang ekuivalen pada daerah geser yang sesuai, yakni A_s , dituliskan dengan:

$$\tau = \frac{V}{A_s} \quad (2.85)$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (2.86)$$

$$k = \frac{A_s}{A} \quad (2.87)$$

di mana V adalah gaya geser pada bagian yang dipertimbangkan. Asumsi yang berbeda dapat digunakan untuk mengevaluasi faktor k yang masuk akal. Salah satu prosedur sederhana adalah mengevaluasi faktor koreksi geser menggunakan kondisi bahwa ketika bekerja pada A_s , tegangan geser konstan dalam (2.85) harus menghasilkan energi regangan geser yang sama dengan tegangan geser aktual (dievaluasi dari teori balok) yang bekerja pada penampang melintang aktual dari area A pada balok (Bathe, 2014).

Gambar 2.25 dan 2.26 menunjukkan balok penampang persegi panjang dua dimensi yang dipertimbangkan. Menggunakan ungkapan umum dari prinsip kerja virtual dengan asumsi yang dibahas di atas, dapat dituliskan persamaan umum:

$$\begin{aligned} EI \int_0^L \left(\frac{d\beta}{dx} \right) \left(\frac{d\bar{\beta}}{dx} \right) dx + GAk \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} - \beta \right) \left(\frac{d\bar{w}}{dx} - \bar{\beta} \right) dx \\ = \int_0^L p\bar{w} dx + \int_0^L m\bar{\beta} dx \end{aligned} \quad (2.88)$$

di mana p dan m berturut-turut merupakan beban transversal dan momen per satuan panjang. Dengan menggunakan interpolasi:

$$w = \sum_{i=1}^q h_i w_i \quad (2.89)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^q h_i \theta_i \quad (2.90)$$

di mana q sama dengan jumlah node yang digunakan dan h adalah fungsi interpolasi satu dimensi, dari penjabaran dapat langsung digunakan konsep dan persamaan formulasi isoparametrik untuk membangun semua matriks elemen yang relevan (Bathe, 2014). Dengan:

$$w = H_w \hat{u}; \quad \frac{\partial w}{\partial x} = B_w \hat{u} \quad (2.91)$$

$$\beta = H_\beta \hat{u}; \quad \frac{\partial \beta}{\partial x} = H_\beta \hat{u} \quad (2.92)$$

2.8.2 Pelat dan Rangka Umum Elemen

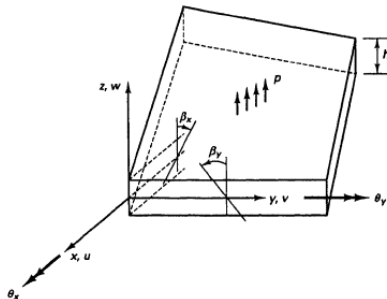
Prosedur yang telah digunakan pada bagian sebelumnya untuk merumuskan elemen balok juga dapat langsung digunakan untuk membentuk elemen pelat dan shell yang efektif. Dalam presentasi berikut, pertama-tama kita membahas formulasi elemen pelat, dan kemudian kita melanjutkan untuk meringkas formulasi elemen kerangka umum.

Formulasi elemen pelat adalah kasus khusus dari formulasi elemen shell umum yang disajikan kemudian dan didasarkan pada teori pelat dengan deformasi geser transversal yang disertakan. Teori ini, menggunakan asumsi bahwa partikel-partikel pelat awalnya pada garis lurus yang normal ke permukaan tengah yang tidak terdeformasi tetap pada garis lurus selama deformasi, tetapi garis ini belum tentu normal pada permukaan tengah yang cacat

(Bathe, 2014). Dengan asumsi ini, komponen perpindahan titik koordinat x , y , dan z adalah, dalam teori lentur perpindahan kecil,

$$u = -z\beta_x(x, y) \quad v = -z\beta_y(x, y) \quad w = w(x, y) \quad (2.93)$$

di mana w adalah perpindahan transversal dan β_x dan β_y adalah rotasi normal ke permukaan tengah yang tidak terdeformasi dalam bidang x, z dan y, z , masing-masing (lihat gambar 2.27). Penting untuk dicatat bahwa dalam teori pelat *Kirchhoff* tidak termasuk deformasi geser, $\beta_x = w_x$ dan $\beta_y = w_y$.



Gambar 2.26 Asumsi dan analisis pada deformasi pelat (Bathe, 2014)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = -z \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial x} + \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.94)$$

Mempertimbangkan pelat pada gambar 2.27 regangan lentur $\epsilon_{xx}\epsilon_{yy}\gamma_{xy}$ bervariasi secara linier melalui ketebalan pelat dan diberikan oleh lengkungan pelat menggunakan persamaan (2.91), sedangkan regangan geser transversal dianggap konstan melalui ketebalan pelat:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \beta_x \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta_y \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

Penting untuk dicatat bahwa setiap komponen regangan geser melintang adalah dalam bentuk dari persamaan (2.82) yang digunakan dalam deskripsi deformasi balok. Keadaan stres di piring sesuai dengan kondisi tegangan bidang (misal, $\tau_{zz} = 0$). Untuk bahan isotropik, dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = -z \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial x} + \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yx} \end{bmatrix} = \frac{E}{2(1 - \nu^2)} \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \beta_x \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta_y \end{bmatrix} \quad (2.97)$$

Mempertimbangkan pelat, ungkapan untuk prinsip kerja virtual adalah, dengan p sama dengan beban melintang per unit area permukaan tengah A , dimana:

$$\int_A \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{\epsilon}_{xx} \quad \bar{\epsilon}_{yy} \quad \bar{\gamma}_{xy}] \begin{bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz dA + k \int_A \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{\gamma}_{xz} \quad \bar{\gamma}_{yz}] \begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} dz dA = \int_A \bar{w} p dA \quad (2.98)$$

di mana *overbar* menunjukkan jumlah virtual dan k lagi-lagi merupakan konstanta untuk memperhitungkan ketidakmerataan

aktual dari tegangan geser (nilai yang biasanya digunakan adalah 5/6 atau 0.8333). Substitusi persamaan dari (2.92) hingga (2.95) ke persamaan (2.96), didapatkan:

$$\int_A \bar{\kappa}^T C_b \kappa dA + \int_A \bar{\gamma}^T C_s \gamma dA = \int_A \bar{w} p dA \quad (2.99)$$

di mana momen lentur internal dan gaya geser masing-masing adalah $C_b \kappa$ dan $C_s \gamma$, dan;

$$\kappa = \begin{bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial x} + \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.100)$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \beta_x \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta_y \end{bmatrix} \quad (2.101)$$

sedemikian hingga:

$$C_b = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \nu/2 \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

$$C_s = \frac{Ehk}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.103)$$

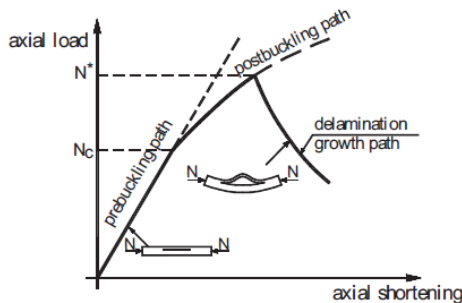
Dari persamaan di atas, perlu diperhatikan bahwa indikator variasiional mengacu pada persamaan (2.96), dimana:

$$\Pi = \int_A \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{\epsilon}_{xx} \quad \bar{\epsilon}_{yy} \quad \bar{\gamma}_{xy}] \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu/2 \end{bmatrix} dz dA \quad (2.104)$$

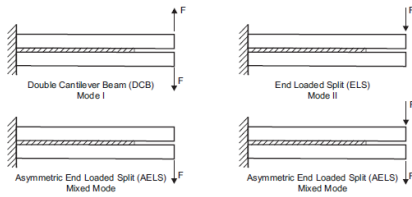
2.9 Analisis Numerik pada Delaminasi

Delaminasi adalah mode kegagalan yang sering mempengaruhi kinerja struktural laminasi komposit. Antarmuka antara lamina menawarkan jalur resistansi rendah untuk pertumbuhan retak karena ikatan antara dua lamina yang berdekatan hanya bergantung pada sifat matriks. Delaminasi dapat berasal dari ketidaksempurnaan pabrikan, retakan yang dihasilkan oleh keletihan atau dampak kecepatan rendah, konsentrasi tegangan dekat diskontinuitas geometris / material seperti sambungan dan tepi bebas, atau karena tegangan antarlaminar yang tinggi.

Dalam laminasi dimuat dalam kompresi, laminasi delaminasi dapat melengkung, dan retak merambat karena interaksi antara pertumbuhan delaminasi dan tekuk. Kehadiran delaminasi dapat mengurangi secara drastis beban tekuk dan kekuatan tekan laminasi komposit (Gambar 2.28). Delaminasi juga dapat didorong oleh tekuk dalam laminasi di bawah pemuatan melintang. Analisis tekuk delaminasi membutuhkan kombinasi analisis struktural nonlinier geometris dengan mekanika fraktur (Barbero, 2014).



Gambar 2.27 Delaminasi akibat *buckling* pada laminat terkompresi (Barbero, 2014)



Gambar 2.28 Tipe-tipe *beam* dalam delaminasi (Barbero, 2014)

Menurut bentuknya, delaminasi diklasifikasikan ke dalam lebar atau strip, melingkar, elips, persegi panjang, atau geometri tidak stabil (*arbitrary*). Bergantung pada lokasinya melalui ketebalan laminasi, delaminasi diklasifikasi ke dalam l_m tipis, pemisahan simetris dan umum. Selain itu, analisis buckling gabungan dan pertumbuhan untuk laminasi komposit yang mengandung banyak delaminasi dalam pemuatan tekan dalam pesawat telah dilakukan. Hasil eksperimen pada tekuk delaminasi disajikan pada. Konfigurasi delaminasi lain yang telah diselidiki dalam literatur adalah spesimen delaminasi tipe balok yang mengalami pembengkokan, aksial, dan pemuatan geser yang membentuk dasar untuk metode eksperimental yang digunakan untuk mengukur kekuatan fraktur interlaminar dalam mode I murni, mode II, dan kondisi mode campuran dalam komposit, sambungan perekat, dan bahan laminasi lainnya (Gambar 2.29).

Dalam pelat dengan sensor piezoelektrik atau aktuatur, ikatan yang tidak sempurna antara lamina piezoelektrik dan pelat dasar dapat tumbuh di bawah pemuatan mekanis dan / atau listrik. Sebagai akibatnya, sifat adaptif dari sistem pintar dapat dikurangi secara signifikan karena debonding menghasilkan perubahan signifikan pada respon statis atau dinamis. Akhirnya, pertumbuhan delaminasi mungkin disebabkan oleh efek dinamis, seperti getaran dan dampak. Sebagai contoh, efek dinamika yang dihasilkan dari inersia laminasi pada proses pertumbuhan yang dihasilkan dari tekukan delaminasi telah diselidiki untuk delaminasi melingkar dan beban tergantung waktu.

Delaminasi dapat dianalisis dengan menggunakan model kerusakan kohesif (subbab 2.11.1) dan mekanika fraktur (subbab

2.11.2). Model kerusakan kohesif mengimplementasikan undang-undang konstitutif antar muka yang didefinisikan dalam hal variabel kerusakan dan hukum evolusi kerusakan. Elemen kerusakan kohesif biasanya disisipkan di antara elemen padat atau elemen balok / rangka (*shell*). Dalam pendekatan mekanika fraktur, propagasi delaminasi yang ada dianalisis dengan membandingkan jumlah laju pelepasan energi (ERR) dengan ketangguhan retak antarmuka. Ketika kondisi mode campuran terlibat, dekomposisi total ERR ke dalam komponen mode I, mode II, dan mode III menjadi diperlukan karena ketergantungan mode campuran dari ketangguhan antarmuka. Sejumlah model berbasis mekanika patah telah diusulkan dalam literatur untuk mempelajari delaminasi, termasuk model tiga dimensi dan model seperti balok sederhana.

Mekanika fraktur memungkinkan kita untuk memprediksi pertumbuhan retak atau cacat yang sudah ada sebelumnya. Dalam benda homogen dan isotropik yang mengalami kondisi pembebanan generik, retakan cenderung tumbuh dengan menekuk ke arah sedemikian rupa sehingga kondisi mode I murni di ujungnya dipertahankan. Sebaliknya, delaminasi pada komposit berlapis dibatasi untuk merambat di bidangnya sendiri karena ketangguhan antarmuka relatif rendah dibandingkan dengan bahan yang berdekatan. Karena celah delaminasi merambat dengan ujungnya yang maju dalam kondisi mode campuran, analisis ini memerlukan kriteria fraktur termasuk ketiga komponen mode (Subbab 2.11.2) (Barbero, 2014).

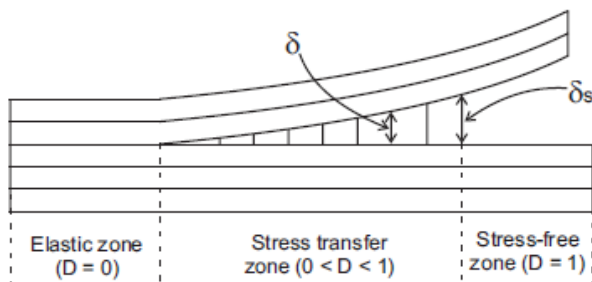
Energi regangan elastis per satuan volume (kepadatan, dalam J/m^3) didefinisikan sebagai $U_0 = 1/2 \sigma_{ij} \epsilon_{ij}$. Energi regangan (dalam J) didefinisikan sebagai integral volume $U = \int_V U_0 dV$. Energi yang dibutuhkan untuk membentuk, atau menyebarkan, suatu retakan sama dengan energi elastis yang dilepaskan oleh padatan selama pembentukan retak. Energi yang dilepaskan adalah perbedaan antara energi regangan elastis yang tersedia sebelum dan setelah retakan terbentuk, yaitu, $-\Delta U = U_{after} - U_{before}$. Tingkat energi yang dilepaskan per unit area retak A diberikan, dalam J/m^2 oleh

$$G = - \frac{\Delta U}{\Delta A} \quad (2.105)$$

di mana A adalah setengah dari luas permukaan yang dibuat. Teori pertumbuhan retak dapat dikembangkan dengan menggunakan salah satu dari dua pendekatan karena Griffith dan Irwin, masing-masing. Pendekatan energi Griffith menggunakan konsep *Energy Release Rate* G sebagai energi (dapat dihitung) yang tersedia untuk patah di satu sisi, dan properti material G_c , yang merupakan energi yang diperlukan untuk patah, di sisi lain (Barbero, 2014).

2.9.1 Metode *Cohesive Zone* (CZM)

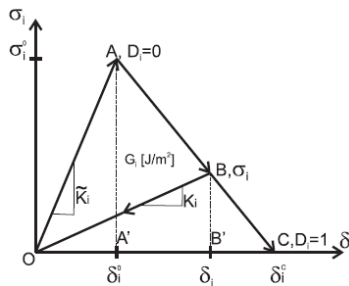
Metode zona kohesif (CZM) didasarkan pada asumsi bahwa kapasitas pemindahan tegangan antara dua wajah yang terpisah dari delaminasi tidak hilang sepenuhnya pada saat inisiasi kerusakan, tetapi lebih merupakan peristiwa progresif yang diatur oleh pengurangan progresif dari antarmuka antara antarmuka antara antarmuka. dua wajah yang terpisah (Gambar 2.29). Antarmuka antara dua kemungkinan wajah yang terpisah dari bahan yang dilaminasi dimodelkan dengan perilaku material yang kohesif, yaitu, metode zona kohesif (CZM). Ada dua jenis elemen yang dapat menggunakan model bahan CZM di ANSYS®, diantaranya adalah:



Gambar 2.29 Mode zona kohesif untuk simulasi pertumbuhan retakan (Barbero, 2014)

1. **Elemen antarmuka (*Interface Elements*)** didasarkan pada traksi-pemisahan ($\sigma - \epsilon$) perilaku konstitutif. Mereka dapat menempati ketebalan nite antara dua permukaan yang mereka gabungkan atau mereka dapat memiliki ketebalan nol. Dalam setiap kasus, kontak antara kedua permukaan diketahui sebelum analisis dan permukaan dengan demikian bergabung dengan elemen antarmuka.
2. **Elemen kontak (*Contact Elements*)** memiliki ketebalan nol dan dapat mendeteksi kontak, pemisahan, penetrasi, dan selip antara permukaan kontak dan permukaan target. Model CZM hanya dapat digunakan dengan kontak terikat.

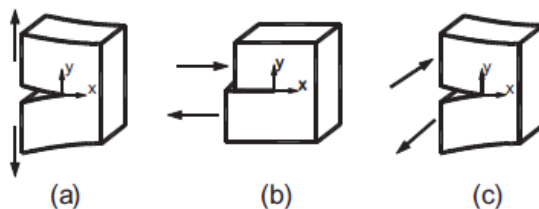
Perilaku kohesif dijelaskan dalam istilah persamaan pemisahan traksi atau pergeseran tegangan (gambar 2.31). Seperti namanya, pendekatan ini menggantikan persamaan teknik *stress-strain* ($\sigma - \epsilon$) dengan persamaan pemisahan-traksi ($\sigma - \delta$). Ketebalan elemen diatur ke nol dengan menentukan node yang berlawanan secara kebetulan dari elemen kohesif. Namun, bahkan jika node yang berlawanan pada awalnya bertepatan, mereka masih terpisah entitas, dan mereka terpisah selama deformasi komposit laminasi. Antarmuka terpisah dari lapisan berlapis dapat dianggap sebagai terhubung satu sama lain melalui kekakuan elemen kohesif. Selama deformasi, pemisahan yang dihasilkan antara permukaan-permukaan yang terhubung dari lapisan-lapisan tersebut sebanding dengan sifat elemen kohesif (Barbero, 2014).



Gambar 2.30 Model Alur Tegangan pada CZM (Barbero, 2014)

Baik elemen antarmuka dengan ketebalan tertentu, dan elemen kontak dengan ketebalan nol, dapat menggunakan persamaan konstitutif traksi-pemisahan CZM. Matriks elemen *stiffness* membutuhkan *stiffness* \tilde{K} dari bahan antarmuka, juga disebut *penalty-stiffness*, tetapi matriks elemen *stiffness* tidak diformulasikan seperti biasa dengan mengintegrasikan volume elemen karena volume awal elemen adalah nol. CZM dapat divisualisasikan sebagai pegas antara node elemen yang awalnya bertepatan. Namun, kekakuan elemen adalah bagian dari kekakuan struktural, dan elemen akan mengalami deformasi selama pemuatan laminasi. Node yang awalnya bertepatan akan terbuka (mode I: pembukaan) atau geser (mode II: geser dan III: sobek) relatif satu sama lain (gambar 2.32). Pemisahan nodal antara elemen selalu diketahui dengan memecahkan struktur yang didiskritisasi.

Jika ketebalan awal elemen adalah nol, keadaan deformasi elemen tidak dapat dijelaskan oleh definisi klasik regangan. Sebaliknya, ukuran deformasi menjadi pemisahan antara wajah yang terhubung melalui elemen, dan ini memungkinkan penggunaan persamaan pemisahan traksi ($\sigma - \delta$) alih-alih persamaan teknik klasik ($\sigma - \epsilon$).



Gambar 2.31 Mode pertumbuhan retak (*crack*); (a) I-pembuka, (b) II-geser, (c) III-robek (Barbero, 2014)

2.9.1.1 Single Mode CZM

CZM diformulasikan dengan asumsi tiga mode perambatan retak tidak berpasangan, bahkan jika beberapa mode aktif secara bersamaan, seperti dijelaskan dalam. Pada bagian ini kami

mempertimbangkan kasus deformasi mode tunggal pada antarmuka bahan laminasi, baik mode I, II, atau III (gambar 2.32). Formulasi serupa untuk salah satu dari tiga mode. Traksi permukaan pada antarmuka adalah i dengan $i = I; II; III$ menunjukkan tiga mode perambatan retak. Pemisahan yang sesuai antara wajah yang berlawanan dari elemen CZM dilambangkan sebagai i , masing-masing terkait dengan traksi permukaan i melalui antarmuka antarmuka K_i , juga disebut hukuman antarmuka. Oleh karena itu, nilai-nilai kekakuan material diperlukan untuk setiap mode pemuatan, yaitu, $K_I; K_{II}; K_{III}$.

Perilaku material pada antarmuka diasumsikan linier-elastis hingga permulaan kerusakan (OA pada Gambar 2.31) dan merusak-elastis setelah itu (OB pada Gambar 2.31). Akibatnya, pemisahan tegangan dijelaskan oleh

$$\sigma_i = K_i \delta_i \quad (2.106)$$

dan,

$$K_i = (1 - D_i) \tilde{K}_i \quad (2.107)$$

di mana D_i adalah variabel kerusakan, dan \tilde{K}_i dalam $[N/mm^3]$ adalah nilai *stiffness* dari bahan yang tidak rusak pada antarmuka, yang menghubungkan tegangan i ke pemisahan relatif i antara sisi berlawanan dari elemen. Nilai kekakuan \tilde{K}_i adalah sifat material tambahan yang diperlukan untuk CZM, yang berbeda dari modulus E Young untuk deformasi normal, atau G untuk deformasi geser.

Untuk setiap mode, ada tingkat tekanan kritis σ_i^0 dan pemisahan δ_i^0 ketika kerusakan pada antarmuka dimulai (titik A pada Gambar 2.31), yang disebut kerusakan *onset*. Pada awal kerusakan, kedua laminasi tidak terpisah sepenuhnya menjadi celah fisik melainkan bahan antarmuka mulai kehilangan stress nya. Di sini, σ_i^0 mewakili kekuatan antarmuka dengan satu nilai kekuatan untuk setiap mode propagasi retak: $\sigma_I^0; \sigma_{II}^0; \sigma_{III}^0$. Dalam CZM, mode ini disebut mode kerusakan karena CZM tidak

menggunakan mekanisme fraktur. Sebaliknya, CZM menggantikan masalah mekanika fraktur dengan masalah mekanika kerusakan kontinum. Oleh karena itu, kekuatan antarmuka merupakan parameter material tambahan yang diperlukan oleh CZM. Oleh karena itu, kriteria inisiasi kerusakan adalah:

$$\sigma_i = \sigma_i^0 \quad (2.108)$$

dan pemisahan saat onset kerusakan dihitung sebagai:

$$\delta_i^0 = \frac{\sigma_i^0}{\bar{K}_i} \quad (2.109)$$

Setelah kerusakan *onset*, bahan antarmuka mulai kehilangan *stiffness* (OB pada Gambar 2.31), menurut persamaan (2.105). Perhatikan bahwa ada banyak variabel kerusakan sebagai mode kerusakan: D_I ; D_{II} ; D_{III} , yang merupakan variabel keadaan yang akan ditentukan selama analisis. Interpretasi fisik persamaan di atas diberikan oleh (2.105) sebagai ukuran degradasi kebebasan. Variabel kerusakan memenuhi kondisi berikut:

1. $D = 0$ hingga kerusakan onset (OA pada Gambar 2.31) sementara bahan antarmuka tidak rusak, sehingga mempertahankan *stiffness* awal.
2. $0 < D < 1$ selama degradasi bahan antarmuka (AF pada Gambar 2.31), ketika bahan secara bertahap kehilangan *stiffness*-nya.
3. $D = 1$ pada fraktur (titik C pada Gambar 2.31), ketika tidak ada *stiffness* yang tersisa untuk bahan antarmuka, yang berarti tidak ada kapasitas transfer tegangan disediakan oleh antarmuka. Ini sesuai dengan fraktur koneksi kohesif antara dua muka (*face*) elemen CZM.

Dengan referensi dan acuan dari gambar 2.31, dapat disimpulkan beberapa persyaratan dan faktor untuk:

$$D_i = \begin{cases} 0 & \delta_i \leq \delta_i^0 \\ 1 & \delta_i = \delta_i^c \end{cases} \quad (2.110)$$

Dalam ruang tegangan-regangan, perilaku kohesif yang digambarkan pada Gambar 10.4 menampilkan pelunakan stres. Yaitu, setelah onset kerusakan, tekanan i pada antarmuka yang rusak memiliki nilai lebih rendah daripada nilai puncak σ_i^0 . CZM menggunakan asumsi klasik kerusakan elastis yang khas dari mekanika kerusakan kontinum (CDM, Bab 8). Oleh karena itu, pembongkaran dari titik mana saja seperti B pada AF garis pada Gambar 2.31 akan kembali ke asal tanpa deformasi permanen pada saat pembongkaran (Barbero, 2014).

Akhirnya, akan ada fraktur total ikatan kohesif (titik C pada Gambar 2.31) ketika kekakuan antarmuka berkurang menjadi nol. Karena kenyataan bahwa total kehilangan σ δ , dan dengan demikian total kehilangan transfer tegangan kohesif, tidak terjadi sampai titik C, CZM berkorelasi dengan kriteria perbanyak retak G pada persamaan (2.103) pada titik C. Korelasi adalah dibuat dengan mempertimbangkan bahwa area di bawah kurva $(\sigma - \delta)$ pada Gambar 2.31 sama dengan ERR G_{ic} kritis dalam prinsip Grith pada persamaan (2.103). Dengan cara ini, pemisahan pada fraktur δ_i^c dapat dihitung sebagai:

$$\delta_i^c = \frac{2G_{ic}}{\sigma_i^0} \quad (2.111)$$

Karena ada nilai ERR kritis untuk setiap mode kerusakan, G_{ic} , dengan $i = I; II; III$, akan ada tiga pemisahan pada fraktur {satu per mode. Tiga nilai ERR adalah properti material yang dibutuhkan oleh CZM, selain tiga nilai kekuatan σ_i^0 dan tiga nilai antarmuka antarmuka \tilde{K}_i . Dari sudut pandang jumlah data eksperimental yang

diperlukan untuk melakukan analisis, ini merupakan kerugian CZM karena memerlukan sembilan nilai eksperimental. Di sisi lain, mekanika kerusakan diskrit hanya membutuhkan tiga nilai ERR untuk memprediksi onset dan evolusi kerusakan. Dengan substitusi persamaan (2.104) ke persamaan (2.105), didapat:

$$D_i = 1 - \frac{\sigma_i \delta_i^0}{\sigma_i^0 \delta_i} \quad (2.112)$$

dengan kemiripan segitiga BB'C dan AA'C, akan didapat:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_i^0} = \frac{\delta_i^c - \delta_i}{\delta_i^c - \delta_i^0} \quad (2.113)$$

sehingga, bila persamaan (2.111) disubstitusi ke persamaan (2.110), maka akan didapat:

$$D_i = \frac{\delta_i^c (\delta_i - \delta_i^0)}{\delta_i (\delta_i^c - \delta_i^0)} \quad (2.114)$$

Dengan cara ini, variabel kerusakan D_i dihitung sebagai fungsi pemisahan relatif antara permukaan laminasi δ_i , yang disediakan oleh solusi elemen hingga dan nilai δ_i^c, δ_i^0 dihitung sebelumnya. Singkatnya, ada empat tahapan berbeda dalam perilaku material yang digambarkan oleh Gambar 2.31:

- perilaku material tidak rusak linier elastis (garis OA), dengan persamaan konstitutif terkait dengan persamaan (2.104).
- inisiasi kerusakan (titik A), dengan kriteria terkait dengan persamaan (2.106).
- kerusakan evolusi (garis AF), dengan persamaan evolusi kerusakan terkait persamaan (2.105) dan (2.112).

- fraktur (pembentukan retak), dengan kriteria pembentukan retak yang terkait persamaan (2.102).

2.9.1.2 Mixed Mode CZM

Ketika antarmuka bahan terlamnasi berada dalam mode campuran, ketiga komponen traksi I ; II ; III dan ketiga komponen pemisahan δ_I , δ_{II} , δ_{III} aktif. Dengan kata lain, mode campuran menyiratkan bahwa dua atau lebih pasangan (σ_i, δ_i) tidak hilang, dengan $i = I$; II ; III . Namun, untuk mengurangi beban eksperimen, diasumsikan bahwa hukuman *stiffness* (2.107) adalah sama untuk semua mode $\tilde{K} = \tilde{K}_i$ (Barbero, 2014).

Rasio mode campuran dapat didefinisikan antara pasangan komponen mode. Misalnya, dalam hal pemisahan:

$$\beta_{\delta_{II}} = \frac{\delta_{II}}{\delta_I} \quad \beta_{\delta_{III}} = \frac{\delta_{III}}{\delta_I} \quad (2.115)$$

atau dalam pernyataan ERR dapat ditulis dengan:

$$\beta_{G_{II}} = \frac{G_{II}}{\sum_1^3 G_i} \quad \beta_{G_{III}} = \frac{G_{III}}{\sum_1^3 G_i} \quad (2.116)$$

Terlepas dari definisi yang digunakan, rasio mode campuran hanyalah parameter yang mencirikan status mode campuran, yang memungkinkan penyederhanaan analisis dengan mengasumsikan bahwa dekohesi berkembang pada rasio mode campuran konstan. Lebih lanjut diasumsikan bahwa mode-mode tersebut tidak dapat dipisahkan meskipun terjadi secara bersamaan. Yaitu, hubungan pemisah tegangan untuk setiap mode yang tidak berpasangan dinyatakan lagi oleh persamaan (2.104), secara terpisah untuk setiap mode.

Selanjutnya, pemisahan mode campuran ditentukan oleh norma L^2 dari pemisahan mode, yaitu,

$$\delta_m = \sqrt{\sum_{i=1}^M \delta_i^2} \quad (2.117)$$

di mana M adalah jumlah mode yang terlibat (mis., 2 atau 3 mode). Selanjutnya, kriteria inisiasi kerusakan mode tunggal dalam (2.106) diganti, misalnya, dengan kriteria tegangan kuadratik:

$$\sum_{i=1}^M \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^0} \right)^2 = 1 \quad (2.118)$$

Untuk kasus mode I dan II saja, $M = 2$ dan pemisahan mode campuran ekuivalen pada *onset* kerusakan δ_m^0 ditemukan sebagai berikut. Pertama, penulisan ulang kriteria inisiasi kerusakan dan deformasi (2.116) dalam hal pemisahan menggunakan persamaan (2.107) dan (2.104) hingga persamaan (2.105), dengan mempertimbangkan bahwa $D_i = 0$ hingga merusak inisiasi. Oleh karena itu, inisiasi kerusakan mode campuran diprediksi dengan persamaan:

$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_I^0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{II}^0} \right)^2 = 1 \quad (2.119)$$

selanjutnya, persamaan (2.115) ditulis ulang dengan menggunakan persamaan (2.113), sehingga didapat:

$$\delta_I = \frac{\delta_m}{\sqrt{1 + \beta^2}} \quad (2.120)$$

dan dengan menggunakan persamaan (2.113) kembali, akan didapat persamaan:

$$\delta_{II} = \beta \frac{\delta_m}{\sqrt{1 + \beta^2}} \quad (2.121)$$

kemudian substitusi persamaan (2.118) dan persamaan (2.119), mengingat bahwa persamaan (2.117) merepresentasikan permulaan kerusakan, salah satu ditulis δ_m^0 untuk δ_m . Sedemikian hingga,

$$\delta_m^0 = \sqrt{(\delta_I^0)^2 (\delta_{II}^0)^2 \frac{1 + \beta^2}{(\delta_{II}^0)^2 + \beta^2 (\delta_I^0)^2}} \quad (2.122)$$

Kuantitas δ_i^0 dalam persamaan (2.120) mewakili pemisahan saat *onset* kerusakan selama pemuatan mode tunggal, dihitung dengan persamaan (2.107) dan merupakan rasio mode campuran, yang diasumsikan konstan selama proses kerusakan. Kriteria propagasi retak mode campuran sekarang diperlukan untuk mengganti kriteria mode tunggal (2.102). Pilihan yang mungkin adalah dengan menggunakan kriteria daya ERR sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^3 \left(\frac{G_i}{G_{ic}} \right)^{\alpha_1} = 1 \quad (2.123)$$

yang mencoba memprediksi fraktur dalam kondisi mode campuran, mirip dengan titik C pada Gambar 2.31 untuk situasi mode tunggal. Untuk mengurangi beban eksperimen, biasanya diasumsikan bahwa eksponen adalah sama untuk semua mode, yaitu, $\alpha_1 = \alpha$.

Setiap komponen mode tunggal G_i dapat dihitung dengan salah satu dari dua persamaan dan metodologi. Beberapa penulis [174, 176] menghitung setiap komponen mode tunggal ERR dengan mempertimbangkan area OABB' pada gambar 2.31, dengan demikian termasuk energi yang dapat dipulihkan OBB' dalam definisi G_i . Pendekatan ini secara tidak langsung terkait

dengan mekanika fraktur linier elastis (LEFM). Penulis lain [185] menggunakan pendekatan mekanika kerusakan di mana masing-masing komponen mode tunggal ERR dihitung dengan mempertimbangkan hanya energi yang tidak dapat dipulihkan yang diwakili oleh area OAB. Kedua pendekatan menghasilkan hasil yang sama untuk delaminasi mode tunggal karena kehilangan adhesi terjadi pada c_i di mana kedua pendekatan memprediksi nilai yang sama untuk G_i (titik B mencapai titik C). Namun, hasil yang berbeda diperoleh untuk delaminasi mode campuran karena retak merambat ketika kriteria interaksi terpenuhi, yang kemudian melibatkan rasio G_i / G_{ic} .

Pada prinsipnya, pendekatan yang didasarkan pada LEFM harus mengarah pada prediksi konservatif dari kapasitas pengangkutan beban untuk delaminasi mode campuran. Di sisi lain, karena energi total yang dihamburkan selama delaminasi pada setiap titik tidak dilepaskan secara instan seperti yang diasumsikan dalam LEFM, definisi kerusakan berdasarkan mekanisme tampak tepat terutama ketika ukuran zona proses fraktur nonlinier di depan bagian depan delaminasi tidak dapat diabaikan sebagai itu dapat terjadi dalam kasus bahan komposit laminasi di mana zona kerusakan mungkin sebanding atau lebih besar dari ketebalan lapis tunggal, yang umumnya terskala dengan bidang tegangan (Barbero, 2014).

2.9.2 Metode *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT)

Teknik *virtual crack closure* (VCCT) dapat digunakan untuk menganalisis delaminasi pada material yang dilaminasi menggunakan pendekatan mekanika fraktur. Metode ini menerapkan *Linear-Elastic Fracture Mechanics* (LEFM). Hanya perambatan retak getas yang dimodelkan. Energi yang dihamburkan oleh pembentukan zona plastik di ujung retak tidak dipertimbangkan.

Kondisi untuk perambatan retak didasarkan pada prinsip-prinsip *Griffith* (2.102). Untuk kasus deformasi mode tunggal dalam kondisi mode I, retakan bertambah ketika:

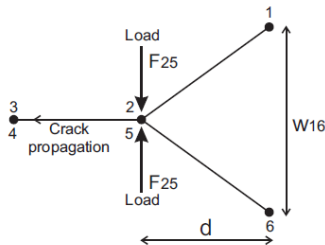
$$\frac{G_I}{G_{Ic}} \geq 1 \quad (2.124)$$

di mana G_I adalah ERR untuk mode I retak formasi dan G_{Ic} properti material yang mewakili ERR kritis untuk formasi mode I retak. Definisi ERR diberikan oleh (2.101). Dalam VCCT, persamaan Irwin (2.103) digunakan untuk menghitung perubahan energi peregangan U , yang dianggap sama dengan usaha yang diperlukan untuk penutupan retak, $W_{closure}$.

Dengan substitusi persamaan (2.103) dan persamaan (2.101) ke persamaan (2.127). kondisi untuk perambatan retak dengan beban yang bekerja dengan mode I, menjadi:

$$\frac{W_{closure}/\Delta A}{G_{Ic}} \geq 1 \quad (2.125)$$

Pekerjaan penutupan retak $W_{closure}$ dihitung dari pemisahan dan gaya nodal FE seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 10.9. Awalnya permukaan retak terikat erat. Pasukan nodal pada simpul kebetulan 2-5 dihitung dari solusi FE (Barbero, 2014).



Gambar 2.32 Model dan distribusi VCCT (Bathe, 2014)

Hipotesis dari perambatan retak mirip diri digunakan, yang mengatakan bahwa selama perambatan retak, konfigurasi retak antara node 2-3-4-5 akan mirip dengan konfigurasi retak antara

node 1-2-5-6. Ini menyiratkan bahwa pemisahan antara node 2-5 setelah perambatan retak akan sama dengan pemisahan antara node 1-6 sebelum perambatan retak: $v_{2,5} = v_{1,6}$. Jika simpul 2-5 terbuka (perambatan retak), usaha elastis yang diperlukan untuk menutup celah adalah:

$$W_{closure} = \frac{1}{2} F_{2,5} v_{2,5} = \frac{1}{2} F_{2,5} v_{1,6} \quad (2.126)$$

dengan mensubstitusi persamaan (2.124) dan persamaan (2.125), maka akan didapatkan kondisi untuk perambatan retak:

$$\frac{F_{2,5} v_{1,6}}{2\Delta A} \frac{1}{G_{Ic}} \geq 1 \quad (2.127)$$

Area ΔA dari retakan yang baru terbentuk adalah $\Delta A = d \times b$, di mana d adalah panjang elemen hingga yang mengalami perambatan retak, dan b adalah lebar retakan. Metode VCCT bekerja dengan cara yang sama untuk mode II atau III, dengan mempertimbangkan komponen pemisahan dan gaya nodal yang sesuai. Kriteria perambatan retak (2.125) hanya berlaku untuk pemuatan mode tunggal, karena berasal dari kriteria mode tunggal dalam (2.102). Untuk memuat mode campuran, kriteria propagasi retak mode tunggal (2.102) harus diganti dengan kriteria mode campuran. Sebagai contoh, sebuah penyelesaian problem dapat menggunakan persamaan atau hukum pangkat (2.121), di mana ERR kritis G_{ic} , dengan $i = I; II; III$, adalah sifat material dan ERR G_i dihitung sama dengan (2.125) dengan menggunakan VCCT. Atau, orang dapat menggunakan persamaan Benzeggagh-Kenane (BK) atau persamaan Reeder (Barbero, 2014).

2.9.3 Analisis Mesh Sensitivity

Dalam penerapannya pengaplikasiannya, keakuratan, kualitas, dan performa hasil ANSYS sangat bergantung kepada beberapa faktor seperti pemilihan *boundary conditions*, mengatur

analysis settings, penggunaan sifat mekanik material (*material properties*), dan lain sebagainya. Salah satu faktor yang sangat penting dan menentukan kualitas hasil ANSYS adalah jumlah elemen. Penentuan jenis elemen, jumlah elemen, dan ukuran elemen pada setiap geometri yang akan disimulasi akan berpengaruh sangat signifikan terhadap keakuratan hasil simulasi yang dilakukan oleh ANSYS. Dalam aplikasinya, ANSYS memiliki dependensi terhadap kualitas dan ukuran *mesh*. Sehingga dalam mengevaluasi hasil simulasi yang merupakan keluaran dari ANSYS, perlu dilakukan pengujian untuk mendapatkan ukuran *mesh* paling optimum. Pengujian dilakukan dengan cara menguji nilai *critical force* yang merupakan keluaran ANSYS, dikomparasi dengan nilai yang didapat dari persamaan matematika di bawah ini:

$$F_{crit} = \sqrt{\frac{G_{Ic} E_x b^2 h^3}{12 a_0^2}} \quad (2.128)$$

dimana G_{Ic} merupakan nilai energi fraktur kritis untuk mode I (J/m^2), E_x merupakan modulus elastisitas dalam arah X (Pa), b lebar spesimen geometri (m), h merupakan tebal spesimen (m), a_0 merupakan panjang retakan awal (m), dan F_{crit} merupakan *critical force* (N). Dari analisis ini, akan muncul nilai *critical force* yang paling mendekati nilai persamaan.

2.9.4 Energy Release Rate

Energy release rate atau bisa diartikan sebagai laju pelepasan energi, disimbolkan dengan G , merupakan laju dimana sebuah material mengalami kehilangan energi, ketika suatu material mengalami kegagalan mekanik material (*fracture mechanic material*), dimana G memiliki satuan energi per luasan area (Needleman). Tingkat pelepasan energi secara matematis dipahami sebagai penurunan total energi potensial yang diukur dengan kenaikan area permukaan fraktur. Persamaan matematika

yang dapat digunakan untuk melakukan pendekatan terhadap laju pelepasan energi adalah sebagai berikut:

$$G_I = \frac{12(Pa)^2}{E_x B^2 H^3} \left(1 + 0.667 \frac{H}{a} \right)^2 \quad (2.129)$$

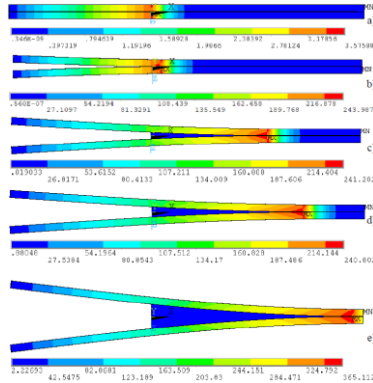
dimana, P merupakan beban yang terletak pada ujung cantilever, dalam hal ini P merupakan *critical force* F_{crit} dalam N, a merupakan panjang retakan awal (*initial crack*) dalam m, B merupakan lebar dari spesimen dalam m, H merupakan ketebalan spesimen dalam m, dan E_x merupakan modulus Young dalam N/m² (Ryu, 2008).

2.10 Penelitian Sebelumnya

Delaminasi merupakan fenomena kegagalan material yang umum terjadi pada material komposit. Penelitian tentang fenomena delaminasi umum dilakukan secara eksperimen dengan berbagai macam variasi, seperti material, kekuatan, beban tegangan, variasi satndar, dan lain sebagainya. Namun, dalam metode elemen hingga, dengan menggunakan piranti lunak ANSYS, hanya dapat dilakukan dengan dua aplikasi *mayor*, yakni ANSYS APDL/MADPL dan ANSYS *Workbench*, dengan varian 3 metode yang berbeda, yakni metode CZM, metode VCCT, dan metode SMART-CG.

Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Waas (2019), dimana Waas melakukan analisis numerik dengan metode *cohesive zone method* (CZM) menggunakan ANSYS *Mechanical* APDL. Pada penelitiannya, digunakan variasi material yakni material komposit serat karbon T300/977-2, material komposit serat karbon AS4/PEEK, material komposit serat karbon HTA/6376C. Semua spesimen dipreparasi dengan geometri *double cantilever beam* (DCB). Parameter yang akan dievaluasi adalah nilai *critical force* dengan varian *mesh* yang berbeda-beda. Gambar 2.35 menunjukkan hasil analisis numerik yang telah dilakukan oleh Waas. Dari hasil simulasi pada meshing finest dengan nilai critical

force masing-masing untuk material 1 (T300/977-2) 117.95 N, material 2 (AS4/PEEK) 201.66 N dan untuk material 3 (HTA/6376C) 98.98 N. Nilai tersebut selain dipengaruhi dari faktor material dan dimensi geometri dan panjang retak awal, nilai *critical force* juga dipengaruhi oleh variasi *meshing*-nya.



Gambar 2.33 Distribusi tegangan von mises pada material 1 yang mengalami proses displacement setelah dilakukan simulasi delaminasi. Displacement pada saat a). 0.02 mm b). 1.5 mm c). 4.02 d). 5.02 mm e). 10.02 mm (Waas, 2019)

Penelitian lainnya dilakukan oleh Shokrieh (2012), dimana dalam penelitian ini, formulasi elemen hingga untuk elemen balok Timoshenko dengan hanya derajat kebebasan perpindahan pertama kali ditujukan untuk balok komposit laminasi. Elemen quadrilateral isoparametrik kontinu yang dihasilkan mudah untuk dirumuskan dan efisien melalui konvergensi dengan jerat kasar di sepanjang ujung retak. Setelah itu, prosedur elemen hingga diusulkan untuk simulasi pertumbuhan delaminasi mode I dalam spesimen multileirect double cantilever beam (DCB) simetris berdasarkan mekanika fraktur menggunakan elemen yang disebutkan di atas. Untuk memperhitungkan efek kurva-R pada spesimen DCB, laju pelepasan energi regangan variabel digunakan

sebagai pengganti ketangguhan fraktur inisiasi yang konstan. Tingkat pelepasan energi regangan dihitung dengan menggunakan metode penutupan retak virtual (VCCT). Hasil simulasi elemen hingga setuju dengan data eksperimen yang tersedia dalam literatur. Ini menegaskan bahwa pendekatan yang diusulkan dapat diandalkan dan layak untuk pemodelan pertumbuhan delaminasi mode I pada komposit laminasi dengan jembatan serat skala besar.

Untuk memvalidasi prosedur yang diusulkan untuk simulasi pertumbuhan delaminasi, beberapa pekerjaan numerik dan eksperimental pada ketangguhan delaminasi mode I dari laminasi searah dan multidirectional disediakan dari literatur. Untuk memastikan bahwa retakan merambat di sepanjang retakan awal dan kejadian tak terduga seperti lompatan retak ke lapisan yang berdekatan tidak terjadi, spesimen DCB multidireksional dengan antarmuka $0^\circ // 0^\circ$ dipilih.

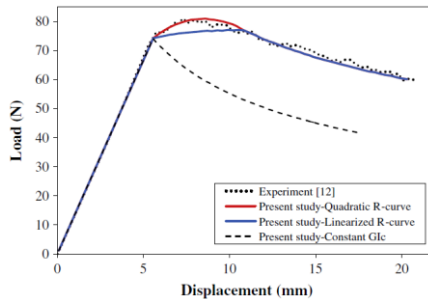
Spesimen DCB yang dilaminasi dibuat dari serat karbon searah (T300)/*prepreg* epoksi yang dikeraskan. Film PTFE setebal $15\mu\text{m}$ digunakan untuk menghasilkan retakan starter. Panjang retakan awal adalah sekitar 70 mm. Lebar spesimen adalah $b = 20$ mm, panjang total 200 mm dan ketebalan $2h = 6$ mm sebagai hasil dari $t = 0,15$ mm lapis lapis. Modulus elastis *ply* yang diukur dari karbon / epoksi adalah: $E_1 = 130$ GPa, $E_2 = 8,2$ GPa, $\nu_{12} = 0,27$ dan $G_{12} = 4,1$ GPa. Isotropi transversal juga diasumsikan dengan $\nu_{23} = 0,41$, nilai khas untuk laminasi serat karbon. Modulus lentur diperkirakan dari Persamaan. (15) sebagai $E_f = 106,4 (\pm 3,46)$ GPa. Dalam studi kasus ini, analisis sensitivitas *mesh* dilakukan lagi sehubungan dengan memprediksi beban inisiasi kritis. Hasil kode elemen hingga menggunakan pendekatan VCCT disajikan pada Tabel 3. Beban kritis eksperimental pada inisiasi pertumbuhan delaminasi adalah sekitar 75,9 N. Hasil menunjukkan bahwa variasi beban inisiasi kritis tidak signifikan di sekitar $\Delta a = 0,125$ mm. Oleh karena itu, nilai ini digunakan sebagai kenaikan retak selama simulasi propagasi delaminasi. Rata-rata ketangguhan patah tulang inisiasi, panjang serat jembatan dan ketangguhan

steady-state dilaporkan $G_{Ic-init} = 380 \text{ J/m}^2$, $a^*_{FB} = 20 \text{ mm}$, dan $G_{Ic-prop} = 660 \text{ J/m}^2$, masing-masing.

Tabel 2.6 Prediksi beban kritis pada *crack-initiation* untuk *cross-ply* (Shokrieh, 2012)

Δa (mm)	$\Delta a/a$	Critical initiation load (N)	Error ^a (%)
1.000	0.013158	74.1	2.372
0.500	0.006579	74.6	1.713
0.330	0.004386	74.8	1.449
0.250	0.003289	74.8	1.449
0.125	0.001645	75	1.186

di mana a^* dan $G_I(a^*)$ masing-masing dalam mm dan J/m^2 . Kurva beban-perpindahan eksperimental dibandingkan dengan yang diprediksi oleh kode elemen hingga yang diusulkan pada Gambar. 2.36. Hasil elemen hingga dengan bentuk kuadrat dari kurva-R sesuai dengan hasil eksperimen. Ini menegaskan kesesuaian menggunakan nilai variabel G_{Ic} daripada nilai G_{Ic} konstan dalam simulasi propagasi delaminasi dengan bridging skala besar. Juga, perilaku kurva-R yang dilinearisasi tidak dapat menangkap kurva perpindahan-beban di daerah jembatan. Dengan demikian, beban maksimum dalam kurva beban-perpindahan diremehkan oleh perilaku kurva-R yang dilinearisasi dibandingkan dengan yang kuadratik.

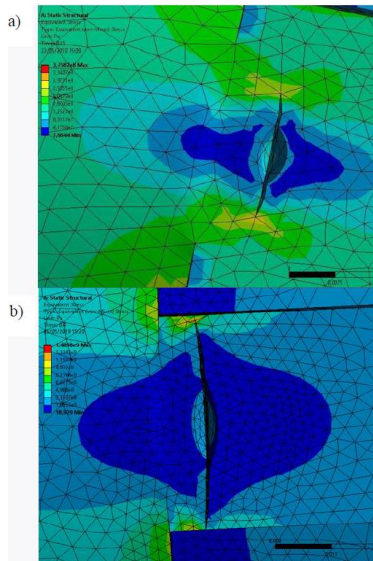


Gambar 2.34 Perbandingan dari kurva beban *displacement* dengan hasil FEM (Shokrieh, 2012)

Penelitian lainnya, dengan metode yang berbad dilakukan oleh Wibowo (2019), dimana pada penelitiannya Wibowo melakukan analisis dan estimasi usia siklus dari poros dengan mempertimbangkan perhitungan faktor intensitas tegangan untuk retak semi elliptical yang diaplikasikan displacement. Analisis metode elemen hingga dengan opsi smart crack growth ANSYS 19.1 untuk melakukan simulasi perambatan retak yang kemudian didapatkan nilai faktor intensitas tegangan dengan variasi panjang retak dan jenis material. Range dari faktor intensitas tegangan digunakan untuk memprediksi laju perambatan retak dan estimasi usia siklus dengan menggunakan hukum Paris. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa semakin kecil initial crack maka energi yang dibutuhkan semakin besar sehingga siklus siklus yang dibutuhkan untuk menyelesaikan patahan lebih lama kemudian untuk penambahan unsur paduan yang bersifat sebagai pembentuk karbida dan penstabil karbida maka semakin mudah membentuk karbida mampu menghambat pertumbuhan butir dan meningkatkan ketangguhan.

Setelah diverifikasi bahwa metode *SMART Crack Growth* dengan stress intensity factor criteria mampu memodelkan perambatan retak degan baik, maka disimulasikan beberapa variasi untuk mengetahui pengaruh panjang initial crack terhadap pola faktor intensitas tegangan dan jumlah siklus. critical crack length maka dapat ditentukan pada siklus berapakah poros dapat dikatakan fraktur mencapai stage instabilitas. Dapat dilihat bahwa pada inisiasi retak 20 mm, perambatan retak yang terjadi lebih panjang dari inisiasi retak 10 mm, yaitu mencapai titik maksimum sebesar 0,0762 m dan terhenti pada contact element. Sedangkan pada inisiasi retak 10 mm mencapai titik maksimum sebesar 0,0322 m dan tidak merambat lebih jauh lagi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah siklus pada baja AISI 4340 dengan inisiasi panjang retak 10 mm sebesar 476000 siklus sesuai dengan critical crack length. Sedangkan untuk kondisi inisiasi retak 20 mm yaitu sebesar 132000 siklus sesuai dengan *critical crack length*.

Berikut adalah gambar hasil simulasi menggunakan ANSYS. Dimana terlihat pada Gambar 2.35 (a) perambatan retak yang begitu jelas namun crack tidak merambat hingga constraint atau batas keyways. Hal ini bisa disebabkan karena meshing yang kurang cocok dan karena material yang mempunyai UTS tinggi dengan inisiasi 10 mm yang tergolong kecil jika dibanding dimensi poros yang mencapai 4 meter sehingga performa computer juga mempengaruhi kemampuan re-meshing pada inisiasi yang kecil. Sedangkan pada Gambar 2.35 (b) retak merambat hingga ke constraint. Karena pada asumsi dan batasan yang terdapat pada ANSYS *Help*, menyebutkan bahwa untuk simulasi retak, retak akan berhenti jika terdapat batasan salah satunya *keyways*. Retak merambat lebih jauh diakibatkan inisiasi retak yang besar yaitu 20 mm atau dua kali dari sebelumnya sehingga proses re-meshing lebih mudah dilakukan pada geometri ini.

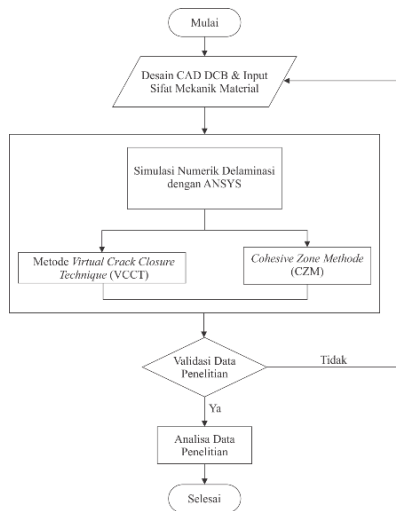


Gambar 2.35 Pola patahan pada baja AISI 4340 dengan inisiasi retak (a) 10mm, dan (b) 20mm dengan pembebanan *displacement* 0.3m (Wibowo, 2019)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan Penelitian

Dalam analisa delaminasi pada penelitian ini, terdapat beberapa tahap yang harus dilakukan secara beruntun untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Langkah-langkah tersebut dirincikan dalam Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat Penelitian

Dalam penelitian tugas akhir ini, terdapat dua jenis material yang digunakan, yang pertama yakni *Epoxy Carbon UD* (CFRP) bertipe *Prepreg Ply* dengan matriks *Resin Epoxy*. Sedangkan material kedua yang digunakan yakni serat kaca berpenguat polimer *Epoxy E-Glass Wet* (GFRP) bertipe *Regular Ply* dengan matriks *Resin Epoxy*. Data dan spesifikasi teknis kedua material yang digunakan pada penelitian ini terurai dalam Tabel 3.1. Metode Penelitian.

Tabel 3.1 Spesifikasi Teknis Material Penelitian

<i>Material Properties</i>	<i>Direction</i>	Serat Kaca	Serat Karbon
<i>Orthotropic Material Properties</i>			
Modulus Young (MPa)	X	35000	121000
	Y	9000	8600
	Z	9000	8600
Rasio Poisson	XY	0.28	0.27
	XZ	0.4	0.40
	YZ	0.28	0.27
Modulus Geser (MPa)	XY	4700	4700
	XZ	3500	3100
	YZ	4700	4700
<i>Orthotropic Stress Limit</i>			
<i>Tensile Properties</i> (MPa)	X	780	2231
	Y	31	29
	Z	31	29
<i>Compressive Properties</i> (MPa)	XY	-480	-1082
	XZ	-100	-100
	YZ	-100	-100
<i>Shear Properties</i> (MPa)	XY	60	60
	XZ	35	32
	YZ	60	60
<i>Orthotropic Strain Limit</i>			
<i>Tensile Properties</i> (MPa)	X	0.0244	0.0167
	Y	0.0038	0.0032
	Z	0.0038	0.0032
<i>Compressive Properties</i> (MPa)	XY	-0.015	-0.0108
	XZ	-0.0125	-0.0192
	YZ	-0.0125	-0.0192
<i>Shear Properties</i> (MPa)	XY	0.016	0.012
	XZ	0.012	0.011
	YZ	0.016	0.012

<i>Exponential for Interface Delamination</i>		
Maximum Normal Traction, T_c (MPa)	10	80
Normal Separation Accross the Interface, d_1 (mm)	0.5	0.5
Shear Separation at Maximum Shear Traction, d_2 (mm)	0.5	0.5
<i>Energy Release Rate Critical</i>		
Mode-I (mJ/mm^2)	0.3	0.352
Mode-II (mJ/mm^2)	0.7	1.45
Dimensi Spesimen	Panjang = 150 mm	
	Panjang <i>crack</i> = 30 mm	
	Tinggi = 3 mm	
	Lebar = 25 mm	
	<i>Displacement</i> = 30 mm (Y dan -Y)	

3.3 Peralatan dan Piranti Lunak Penelitian

Terdapat dua perangkat komputer yang digunakan dalam penelitian simulasi numerik untuk delaminasi material komposit ini, yang pertama yakni *Personal Computer* (PC) yang digunakan untuk menggambar desain dan geometri *double cantilever beam* (DCB) berbasis *computer-aided design* (CAD) yakni laptop dengan spesifikasi RAM 8192 MB, CPU Intel® Core i7 7th generation *Quad-core* @ ~2.9 GHz, dan Windows 10 Pro x64. Yang kedua yakni komputer personal digunakan untuk simulasi numerik dengan spesifikasi RAM 8GB, CPU Intel® Pentium® CPU G2030 @ 3.00 GHz (2 CPUs) ~3.0 GHz dan Windows 7 Home Premium 64-bit sistem.

3.4 Variabel Penelitian

Dalam penelitian simulasi delaminasi ini, untuk membantu mengkomprehensifkan penelitian, akan digunakan 3 jenis variabel

(variabel bebas, variabel tetap, dan variabel kontrol) yang diulas secara rinci dan terdapat dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel Penelitian

Variabel Bebas		Variabel Tetap	Variabel Kontrol
Material	Metode		
GFRP	CZM	Kondisi Batasan, Ukuran Elemen, Orientasi Serat, Orientasi Beban, Mode Kegagalan	Karakterisasi Delaminasi, Kurva Tegangan- Regangan, Tegangan Geser, <i>Critical Force</i>
	VCCT		
CFRP	CZM		
	VCCT		

3.5 Tahapan Penelitian

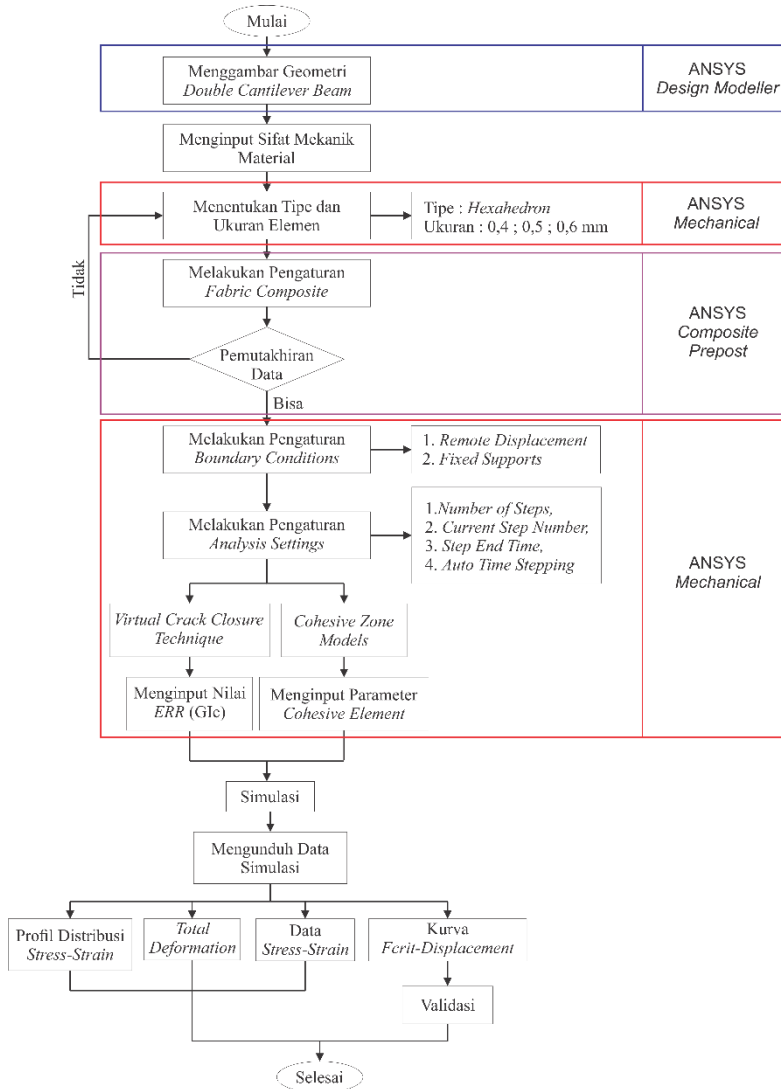
Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari 4 tahap, pertama perhitungan dan persiapan data awal, kedua pelaksanaan tahap *preprocessing*, tahapan ketiga yakni *postprocessing*, dan terakhir tahapan keempat yakni pengolahan dan analisis data hasil simulasi.

3.5.1 Pembuatan Geometri

Pembuatan geometri didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Ronald Krueger (NASA/NIA) dan Dirk Goetze (*University of Stuttgart*) pada tahun 2011, pada penelitian dengan menggunakan CFRP dan GFRP. Spesifikasi geometri (dimensi) untuk penelitian delaminasi menggunakan standar D5528. Lebar dari setiap spesimen dikontrol sama pada semua tes yang dilaksanakan. Secara rinci, dimensi spesimen terdapat pada Tabel 3.1. Dalam penelitian ini, untuk pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Design Modeller* R19.1 lalu di-*couple* dengan menggunakan modul ANSYS ACP (*Pre*) R19.1, pada ANSYS *Workbench* R19.1.

3.5.2 Pelaksanaan Analisis Numerik

Dalam pelaksanaannya, untuk mendapatkan parameter yang sesuai dengan literatur yang digunakan, pada penelitian simulasi ini harus sesuai dengan prosedur dan tahapan yang telah ditentukan berdasarkan instruksi pada ANSYS. Tahapan dan prosedur analisis numerik pada ANSYS memiliki tahapan-tahapan yang teratur untuk mendapatkan hasil analisis. Diagram alir simulasinya adalah sebagai berikut.

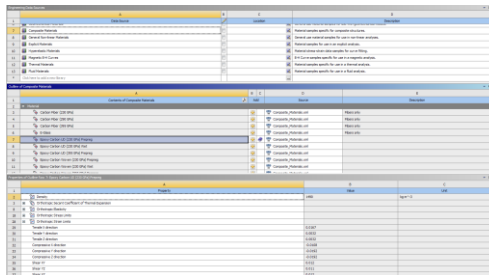


Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi

Terkait dengan diagram alir simulasi di atas, penjelasan tentang alur simulasi adalah sebagai berikut :

1. Input *material properties*

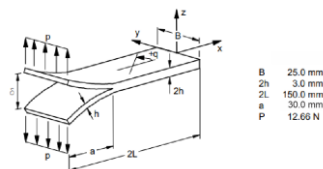
Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, pada penelitian ini digunakan material CFRP dan GFRP yang masing memiliki nilai sifat mekanik yang berbeda. Sebenarnya dalam *database* ANSYS terdapat data sifat mekanik untuk kedua material ini, sehingga cukup dilakukan input data pada bagian *Engineering Data* pada kelompok *Composite Materials*.



Gambar 3.3 Input sifat mekanik pada *Engineering Data Library*

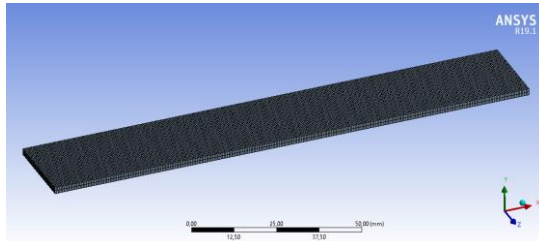
2. Pembuatan Geometri

Pembuatan untuk metode CZM dan VCCT, pembuatan geometri dilakukan pada perangkat lunak ANSYS *Design Modeller*. Desain geometri dan teknis dimensi dari geometri terdapat pada Gambar 3.4.



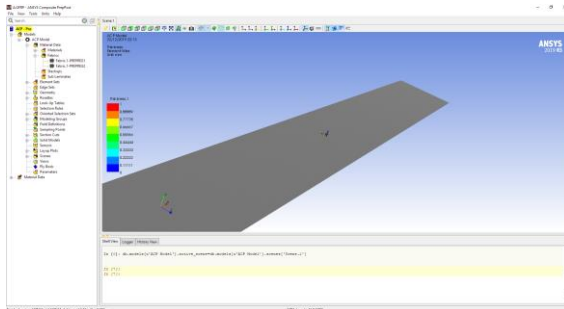
Gambar 3.4 Dimensi dari geometri penelitian (Krueger, 2006)

3. Menentukan Tipe dan Ukuran Elemen
Pada bagian ini, ditentukan jenis dan ukuran elemen sesuai dengan metode yang digunakan. Untuk tipe *mesh* yang akan digunakan adalah *uniform hexahedron*, sedangkan untuk ukuran elemen, akan dilakukan pengujian *mesh sensitivity* menggunakan variabel ukuran elemen sebesar 0.4, 0.5, dan 0.6 mm, dengan parameter keluaran adalah *critical force* yang memiliki nilai uji kesalahan (*Error Validation*) yang paling kecil. Lebih lanjut akan dibahas pada bab selanjutnya.

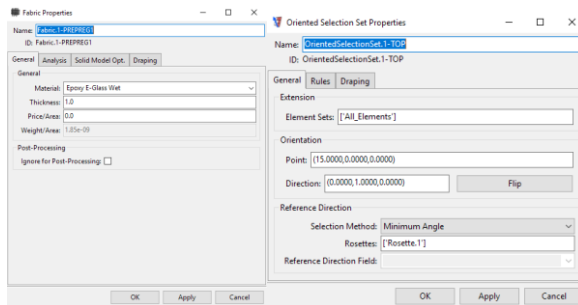


Gambar 3.5 Geometri setelah dilakukan *meshing*

4. Melakukan Preparasi Komposit pada ACP
ACP merupakan kependekan ANSYS *Composite PrepPost*, merupakan sebuah teknologi dalam perangkat lunak ANSYS yang dapat digunakan untuk mempreparasi komposit beserta spesifikasi yang diinginkan seperti ketebalan *layer*, susunan laminat, dimensi, sampai orientasi *fabric*. Preparasi yang dilakukan adalah melakukan pengaturan jenis material dan serat komposit, mengatur orientasi, ketebalan dan *global coordinate system*.



Gambar 3.6 *Interface* dari Modul ANSYS ACP



Gambar 3.7 *Interface* ANSYS ACP untuk pengaturan; material *fabric* (kiri) dan orientasi elemen (kanan)

Setelah semuanya telah tersusu dan diatur sesuai dengan kondisi batasan masalah yang telah ditentukan, ANSYS ACP dapat di-*update* untuk kemudian dilanjutkan pada modul selanjutnya, yakni ANSYS *Static Structural*, dimana proses simulasi dan kalkulasi akan dilakukan di modul ini.

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Body Color
[-] Defaults	
Physics Preference Mechanical	
Element Order	Program Controlled
Element Size	0.5 mm
[-] Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
Growth Rate	Default (1,2)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeaturing Size	Default (0.5e-003 mm)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Enable Washers	No
Bounding Box Di.	152.07 mm
Average Surface	1875. mm ²
Minimum Edge L.	25. mm
[-] Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standards Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None

Gambar 3.8 Pengaturan untuk melakukan *geometry meshing*

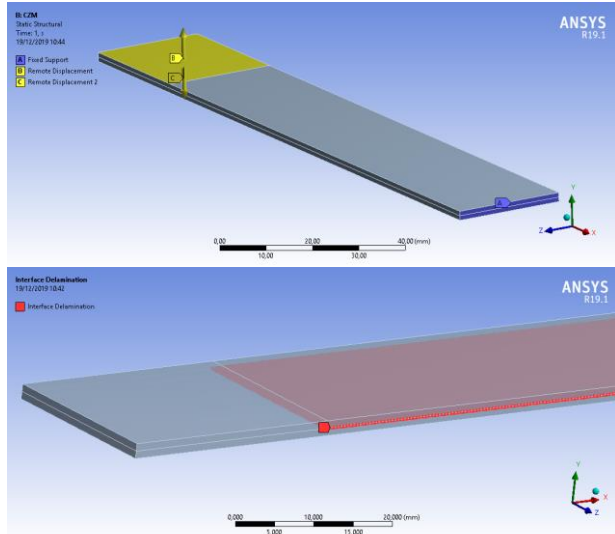
5. Menyusun *Analysis Settings*
Analysis settings merupakan pengaturan yang digunakan untuk memonitoring dan menjaga simulasi sesuai dengan kondisi aslinya. Untuk pengaturan ini, semua metode harus disamakan untuk mencapai tujuan penelitian.

Details of "Analysis Settings"	
[-] Step Controls	
Number Of Steps	40,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
[-] Rotordynamics Controls	
[-] Restart Controls	
[-] Fracture Controls	
Fracture	On
SIFS	Yes
J-Integral	Yes
Material Force	No
T-Stress	No

Gambar 3.9 Pengaturan untuk *Analysis settings*

6. Melakukan pengaturan *Boundary Conditions*
Sama dengan *Analysis settings*, *Boundary conditions* diperlukan untuk menjaga simulasi agar bisa terkontrol

dengan baik. Hal ini juga nantinya akan berpengaruh signifikan terhadap hasil simulasi.



Gambar 3.10 Pengaturan *Boundary Conditions* untuk *Presimulations* (atas) dan untuk *Interface Delaminations* (bawah)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pendekatan secara numerik menggunakan metode elemen hingga untuk mengamati fenomena delaminasi pada material komposit *glass fiber-reinforced polymer* (GFRP) dan *carbon fiber-reinforced polymer* (CFRP) telah dilakukan. Material properties dari masing-masing material dapat ditinjau pada Tabel 3.1. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, yakni ANSYS *Workbench Mechanical R19.1*. Pada simulasi ini digunakan 2 metode pendekatan numerik yang berbeda, yakni metode *Cohesive Zone Method* (CZM) dan *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT).

4.1 Analisis Data

Dalam penelitian ini, setelah dilakukan simulasi terhadap 2 variabel material dan 2 variabel metode delaminasi, akan dilakukan analisis data, untuk menentukan, mempelajari, mengidentifikasi, dan mengevaluasi setiap hasil simulasi delaminasi untuk setiap variabel dengan masing-masing metode.

4.1.1 Analisis Mesh Sensitivity

Pada penelitian ini, telah dilakukan *mesh sensitivity analysis* atau analisis sensitivitas *mesh*, dimana sebelum dilakukan penarikan kesimpulan dan melakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan pengujian keakuratan penggunaan ukuran elemen, dengan metode *mesh sensitivity analysis*. Pengujian nilai *mesh sensitivity* didasarkan terhadap nilai validasi pada besaran nilai *critical force*. Nilai *critical force* sendiri dievaluasi berdasarkan sifat bawaan material terhadap geometri yang akan diuji dan dihitung sebagaimana persamaan 2.128.

Setelah dilakukan perhitungan manual, dan didapat data *critical force* dari ANSYS, maka dilakukan perhitungan persentase *error*, dimana persentase *error* digunakan untuk melihat seberapa

besar kesalahan yang terjadi pada perhitungan simulasi. Persentase *error* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{V_{\text{validation}} - V_{\text{ANSYS}}}{V_{\text{validation}}} \right| \times 100\%$$

dimana $V_{\text{validation}}$ merupakan nilai yang didapat dari perhitungan analisis pada persamaan F_{crit} sedangkan V_{ANSYS} merupakan nilai F_{crit} yang didapat dari hasil simulasi ANSYS. Dari sini untuk kemudian dievaluasi masing-masing nilai *error* yang dihasilkan, sehingga didapat ukuran dan jumlah elemen yang paling bagus untuk dijadikan acuan dalam pembahasan selanjutnya.

Berikut perhitungan nilai *critical force* untuk *GFRP* :

$$F_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{G_{Ic} E_x b^2 h^3}{12 a_0^2}}$$

$$F_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{(343,65 \text{ J/m}^2)(35 \times 10^9 \text{ Pa})(25 \times 10^{-3} \text{ m})^2(3 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12(30 \times 10^{-3} \text{ m})^2}}$$

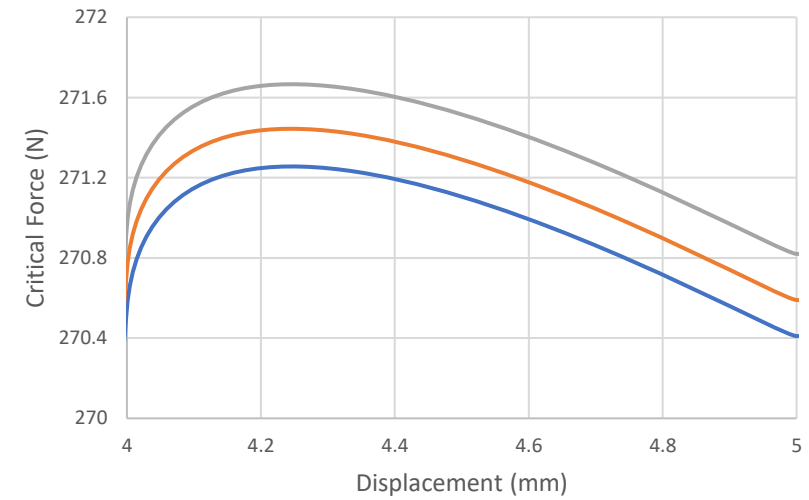
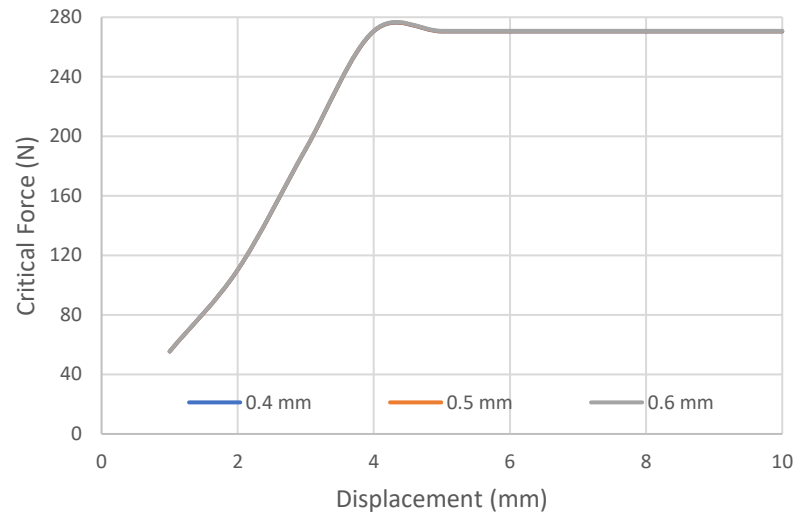
$$F_{\text{crit}} = 137,09 \text{ N}$$

setelah dilakukan perhitungan nilai *critical force* untuk *GFRP*, dapat dilanjutkan untuk melakukan perhitungan nilai *critical force* untuk *CFRP*, dimana:

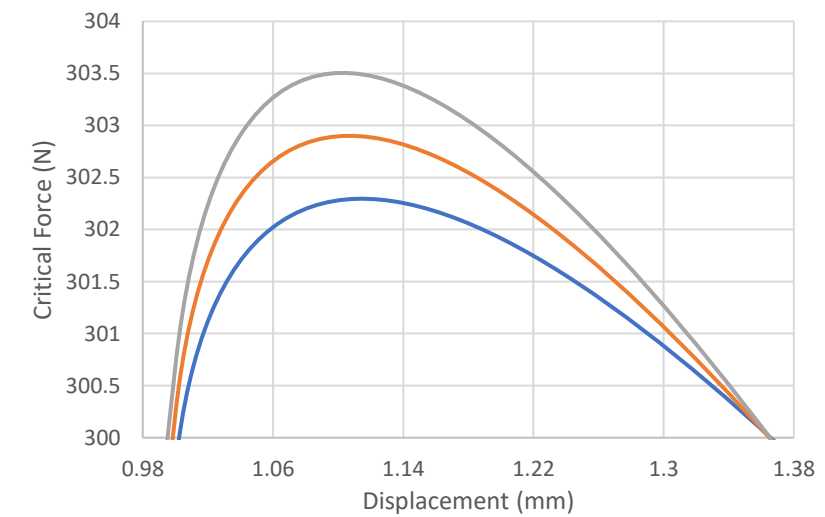
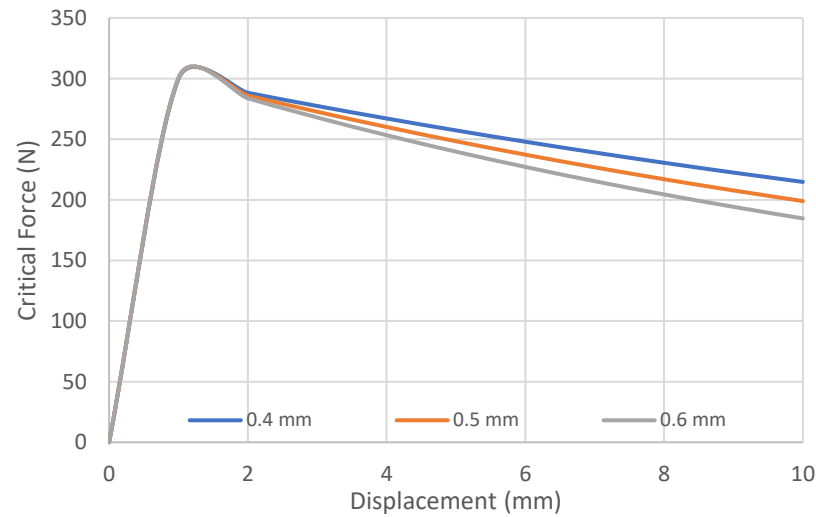
$$F_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{G_{Ic} E_x b^2 h^3}{12 a_0^2}}$$

$$F_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{(352 \text{ J/m}^2)(150 \times 10^9 \text{ Pa})(25 \times 10^{-3} \text{ m})^2(3 \times 10^{-3} \text{ m})^3}{12(30 \times 10^{-3} \text{ m})^2}}$$

$$F_{\text{crit}} = 287,23 \text{ N}$$

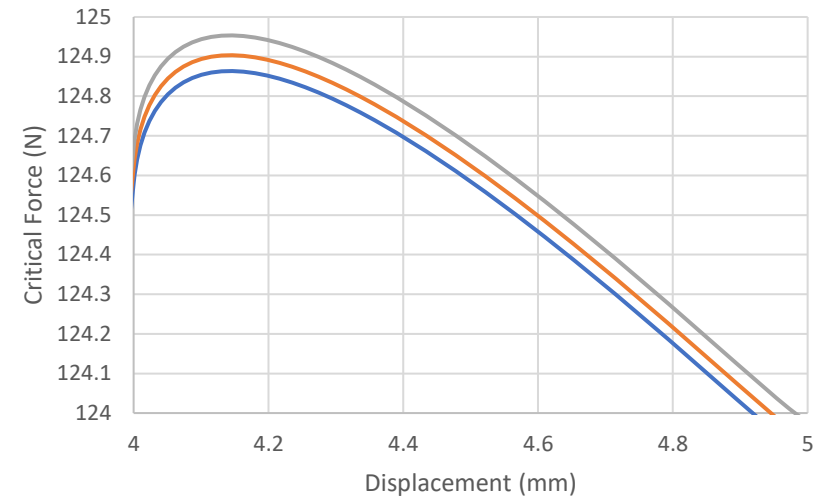
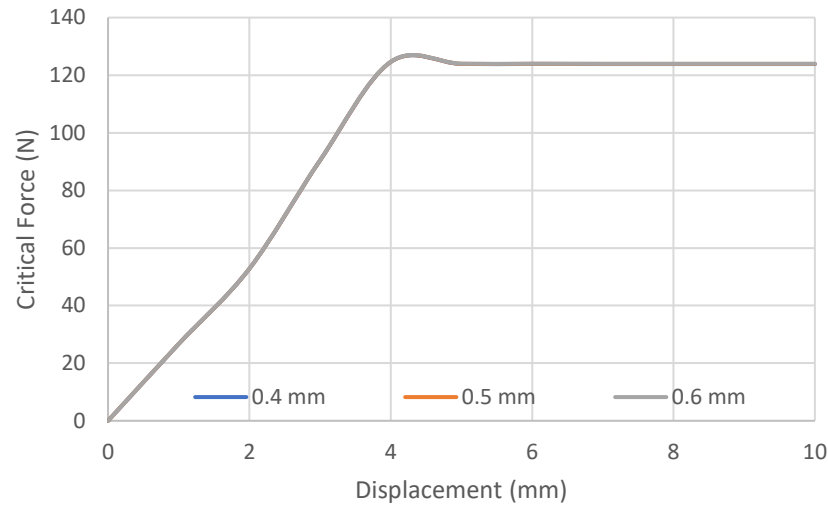


(a)

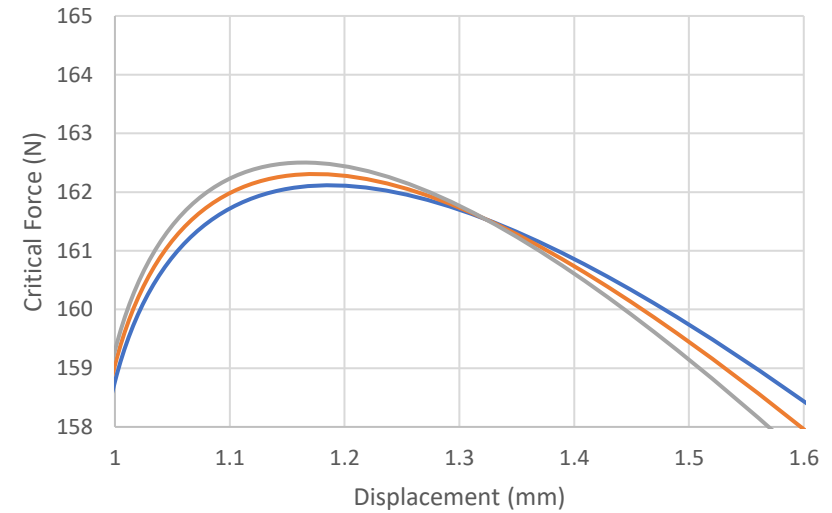
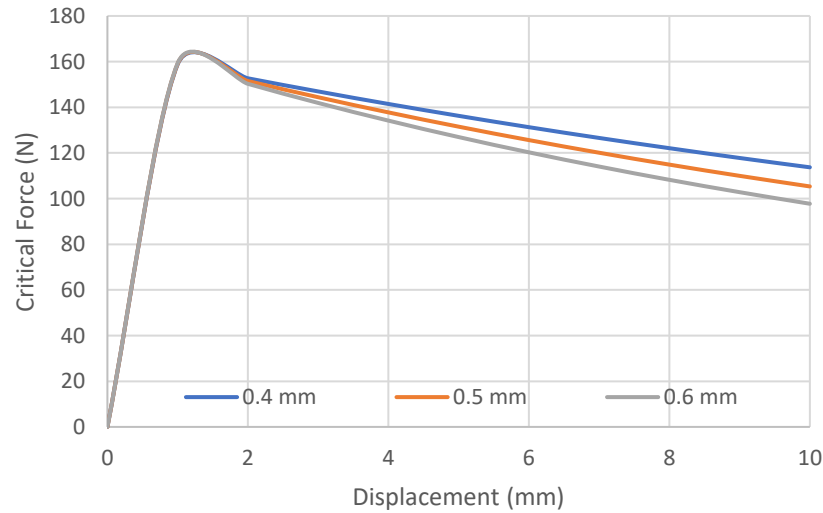


(b)

Gambar 4.1 Perbandingan *mesh* pada nilai F_{crit} terhadap *displacement* dengan skala asli (kiri) dan diperbesar (kanan) pada material CFRP dengan; (a) Metode CZM, (b) Metode VCCT



(a)



(b)

Gambar 4.2 Perbandingan mesh pada nilai F_{crit} pada skala asli (kiri) dan diperbesar (kanan) pada material GFRP; (a) Metode CZM, (b) Metode VCCT

Pada Gambar 4.1 di atas, nampak sekali bahwa pada grafik dengan skala asli, garis tren antar *mesh* saling berhimpit satu sama lain. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *critical force* yang dihasilkan oleh simulasi ANSYS memiliki nilai yang hampir serupa. Namun perlu dicatat bahwa setiap ukuran elemen memiliki nilai maksimum yang berbeda-beda. Hal ini ditunjukkan oleh gambar grafik pada skala diperbesar. Tampak pada grafik tersebut, ukuran elemen 0.6 mm memiliki nilai *critical force* tertinggi dengan nilai 270.82 N, sedangkan nilai terendah terdapat pada elemen 0.4 mm dengan nilai 270.55 N.

Pada gambar grafik di atas, merupakan hasil dari perbandingan nilai simulasi *critical force* terhadap masing-masing ukuran elemen pada material CFRP dengan menggunakan metode VCCT. Hasil yang cukup berbeda ditunjukkan pada pengujian dengan menggunakan metode VCCT. Meskipun pada garis tren turun setelah material mengalami *critical failure* memiliki gradien yang berbeda-beda, namun ketika dalam tahap inisiasi pertumbuhan (*crack propagating initiation*), garis tren naik memiliki gradien yang hampir sama. Hal ini ditunjukkan pada gambar grafik pada skala asli. Sama dengan metode CZM, pada metode VCCT ini, masing-masing ukuran elemen memiliki nilai *maximum force* yang berbeda-beda, dengan nilai tertinggi dimiliki oleh ukuran elemen 0.6 mm sebesar 300.68 N dengan nilai *error* sebesar 4.68%, sedangkan nilai terendah terdapat pada ukuran elemen 0.4 mm dengan nilai *critical force* sebesar 299.71 N dengan nilai *error* berada pada 4.34%. Untuk grafik analisis sensitivitas *mesh* pada metode CZM dan VCCT untuk material GFRP tersaji pada Gambar 4.2.

Grafik pada Gambar 4.2 merupakan grafik perbandingan antar ukuran elemen terhadap besaran nilai *critical force* yang didapat dari simulasi ANSYS. Hampir serupa dengan trendline yang dimiliki oleh grafik CZM pada material CFRP, pada grafik ini diperlihatkan bahwa garis antar ukuran elemen memiliki nilai yang hampir serupa, dimana hal ini ditunjukkan oleh garis yang saling berhimpit dan bertumpuk, ditunjukkan oleh gambar grafik

pada skala asli. Namun sama seperti grafik-grafik sebelumnya, masing-masing ukuran elemen memiliki nilai *maximum force* yang berbeda-beda. Dengan ukuran elemen 0.4 mm, nilai *maximum force* yang didapat oleh hasil simulasi ANSYS adalah sebesar 124.89 N, untuk ukuran elemen 0.5 mm memiliki nilai *maximum force* sebesar 124.95 N, dan untuk ukuran elemen 0.5 mm, hasil ANSYS untuk *maximum force* adalah 124.99 N. Untuk analisis *mesh sensitivity* dengan metode VCCT pada material GFRP dapat dilihat pada gambar grafik di bawah ini. Dengan demikian, nilai *error* untuk ukuran elemen 0.4 mm, 0.5 mm, dan 0.6 mm berturut-turut adalah sebesar 5.8%, 5.79% dan 5.71%.

Dengan pembahasan yang serupa pada metode VCCT dengan material CFRP, metode VCCT yang diterapkan pada material GFRP juga menghasilkan keluaran yang memiliki model yang hampir serupa dengan hasil simulasi CFRP dengan metode VCCT. Untuk nilai *maximum force* didapat dengan menggunakan ukuran elemen 0.6 mm, dengan nilai *force* sebesar 300.68 N, lalu ukuran 0.5 mm dengan nilai *maximum force* 300.22 N, dan paling kecil adalah ukuran 0.4 mm dengan nilai *maximum force* sebesar 299.71 N. Dari hasil yang sudah ada nilai *error* pada *critical force* untuk ukuran elemen 0.4; 0.5; dan 0.6 mm berturut-turut adalah sebesar 4.34; 4.52; dan 4.68%.

Tabel 4.1 Hasil *Mesh Sensitivity Analysis*

Material	Metode	Ukuran Elemen (mm)	Jumlah Elemen	Nilai Validasi Fcrit (N)	Nilai ANSYS (N)	% Error
CFRP	CZM	0,4	47250	287,23	270,55	5,8
		0,5	30000		270,59	5,79
		0,6	21000		270,82	5,71
	VCCT	0,4	47250		299,71	4,34
		0,5	30000		300,22	4,52
		0,6	21000		300,68	4,68
GFRP	CZM	0,4	47250	137,09	124,58	9,13
		0,5	30000		123,9	9,62
		0,6	21000		123,95	9,58
	VCCT	0,4	47250		152,7	11,38
		0,5	30000		159,05	16,02
		0,6	21000		159,3	16,2

Dari Tabel 4.1, tampak terdapat anomali yang terjadi pada analisis *mesh* ini, dimana, khusus pada material CFRP dengan menggunakan metode CFRP. ukuran elemen yang digunakan memiliki hasil yang terbalik. Secara teori, semakin kecil ukuran mesh, maka nilai error yang dihasilkan semakin kecil pula, atau bisa dikatakan linear (Waas, 2017), namun pada penelitian ini ditemukan keterbalikan, dimana semakin kecil ukuran elemen yang digunakan, nilai error yang dihasilkan semakin besar, atau bisa dikatakan terbalik. Hal ini umumnya disebabkan oleh beberapa hal seperti banyaknya iterasi yang digunakan, konvergensi perhitungan, dan besaran nilai CP pada ANSYS Mechanical. Meski ukuran elemen pada metode CZM pada material CFRP ini tidak sesuai dengan tren pada teori, namun ukuran elemen 0.4 mm tetap dapat digunakan karena selisih error antar ukuran elemen relatif kecil. Berdasarkan perhitungan nilai error pada acuan nilai critical force failure, dapat disimpulkan dari tabel bahwa nilai mesh yang paling cocok digunakan untuk analisis simulasi delaminasi ini adalah ukuran 0.4 mm, karena memiliki nilai error pada critical force yang paling rendah diantara ukuran elemen yang diuji-cobakan.

Telah dilakukan simulasi delaminasi pada ANSYS dengan menguji semua variabel, yakni variabel material dan variabel metode, terlebih dahulu dilakukan uji mesh sensitivity dimana hasil simulasi ANSYS dibandingkan dan dikomparasi untuk mencari hasil yang paling reliable, dengan menguji kehalusan dan ukuran elemen. Pada subbab sebelumnya telah didapat kesimpulan bahwa nilai mesh dengan ukuran elemen 0.4 mm dan jumlah elemen 47250 memiliki hasil paling bagus dan reliable, dengan parameter nilai error yang paling kecil. Sehingga untuk pembahasan dan telaah hasil simulasi delaminasi, akan didasarkan pada pengujian dengan menggunakan ukuran elemen 0.4 mm.

4.2 Analisis Variasi Metode dan Material terhadap Karakteristik Delaminasi

Seperti yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, terdapat beberapa data yang dapat di-*export* dan digunakan untuk pembahasan dalam mengamati beberapa parameter yang telah ditentukan dalam penelitian ini, yakni karakteristik delaminasi. Karakteristik delaminasi dapat ditentukan dengan mempelajari beberapa data, yakni kurva *Stress-Strain* dan *Stress-Strain Distribution*.

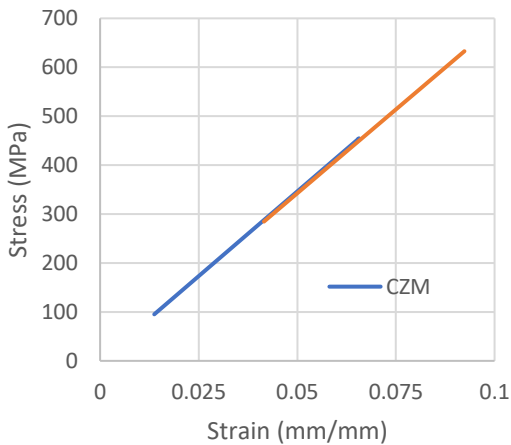
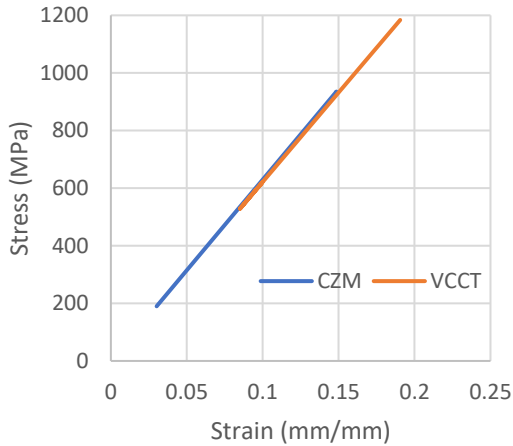
4.2.1 Pengaruh Metode dan Material terhadap Kurva Stress-Strain

Sebagai pembuka, dalam menganalisis kegagalan material delaminasi pada komposit dengan menggunakan metode elemen hingga, terdapat dua teknik atau metode yang dapat digunakan, yakni metode Cohesive Zone Model (CZM) dan Virtual Crack Closure Technique (VCCT). Meskipun sama-sama digunakan untuk mengamati fenomena delaminasi, kedua metode ini didasarkan pada teori yang berbeda, sehingga perlu dilakukan analisis untuk mengamati perbedaan apa saja yang terdapat dalam kedua metode ini.

Kurva stress-strain dapat digunakan sebagai langkah awal dalam menginspeksi dan mengevaluasi perbedaan yang terdapat dalam dua metode ini, yakni dengan membandingkan kurva stress-strain material yang sama dengan metode yang berbeda. Dalam subbab ini, akan dibahas seberapa besar pengaruh kedua metode tersebut, yakni CZM dan VCCT terhadap kurva stress-strain yang dihasilkan.

Data stress-strain didapat dari hasil simulasi delaminasi dengan melakukan pengujian pengambilan data atau data examining terhadap data keluaran ANSYS, yang mengaju kepada *Equivalent Stress* (von Mises *Stress*) dan *Equivalent Elastics Strain* (von Mises *Strain*). Setelah didapat data keduanya, kemudian diplot pada masing-masing titik sehingga didapat kurva

stress-strain. Gambar di bawah ini menunjukkan kurva stress-strain yang dimiliki oleh GFRP dan CFRP dengan analisis oleh metode CZM dan VCCT.



Gambar 4.3 Grafik *Stress-Strain* pada CFRP (atas) dan GFRP (bawah)

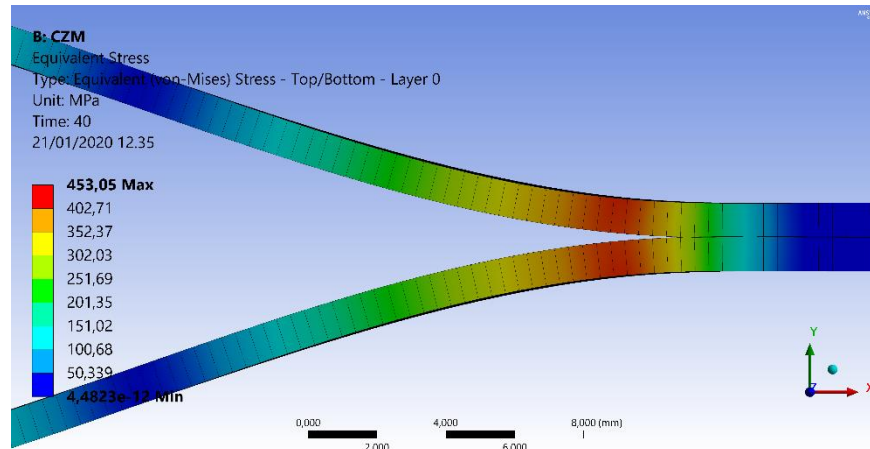
Tampak dari Gambar 4.3 bahwa kurva yang dihasilkan dari kedua metode untuk kurva stress-strain saling berhimpit, artinya kedua garis memiliki nilai signifikansi yang rendah, sehingga dapat dikatakan nilai yang dihasilkan dari kedua metode hampir sama. Hal ini terjadi karena pada dasarnya kurva stress-strain dihasilkan oleh material yang dikenai beban, kemudian mengalami peregangan (strain) sebagai akibat dari respon terhadap beban yang diterima, dan murni dari sifat mekanika material. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa untuk pengaruh metode analisis delaminasi terhadap sifat intrinsik material dianggap tidak ada.

Namun pada grafik tersebut, tampak nilai maksimum VCCT lebih tinggi dibandingkan dengan nilai maksimum CZM. Hal ini disebabkan karena pada metode VCCT, perhitungan beban awal delaminasi didasarkan pada closure point, mengacu pada Subbab 2.11.2, pada Gambar 2.33, beban yang dihitung oleh metode VCCT dimulai pada perobekan titik-titik laminatnya, sehingga baru terhitung ketika crack propagation melewati initial crack, sedangkan metode CZM, sebagaimana dijelaskan pada Subbab 2.11.1.1 pada Persamaan 2.104, ketika terdapat displacement sekecil apapun, akan terdapat perubahan terhadap nilai K_I , yang juga akan berpengaruh pada nilai stress initiation (σ_i).

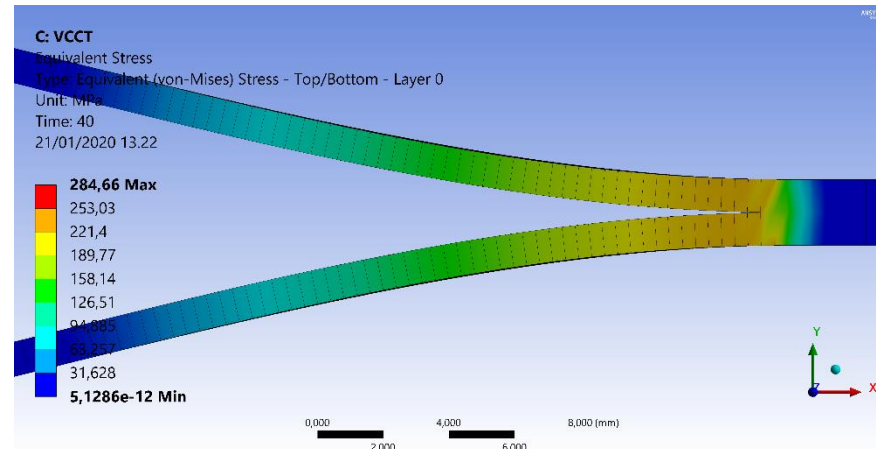
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

4.2.2 Pengaruh Metode dan Material terhadap *Stress-Strain Distribution*

Material GFRP :

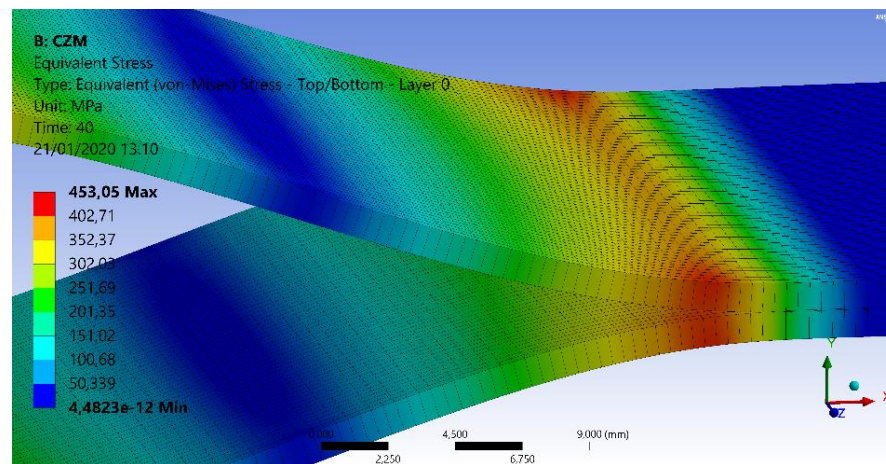


(a)

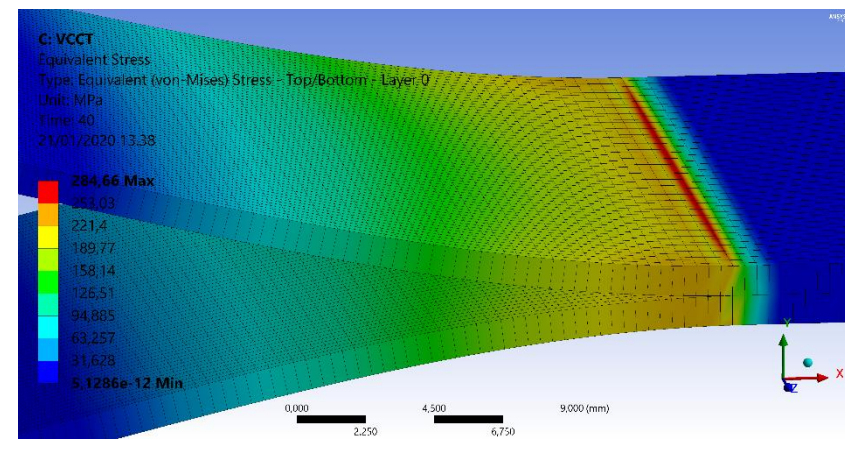


(b)

Gambar 4.4 Hasil *Equivalent Stress* pada Metode (a) CZM dan (b) VCCT

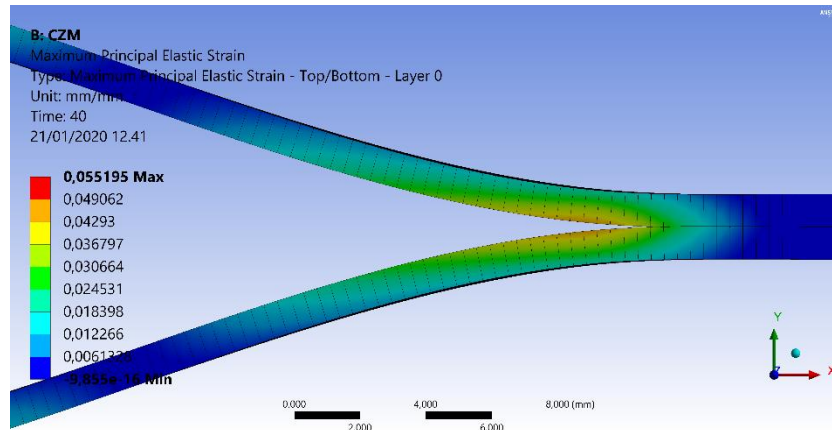


(a)

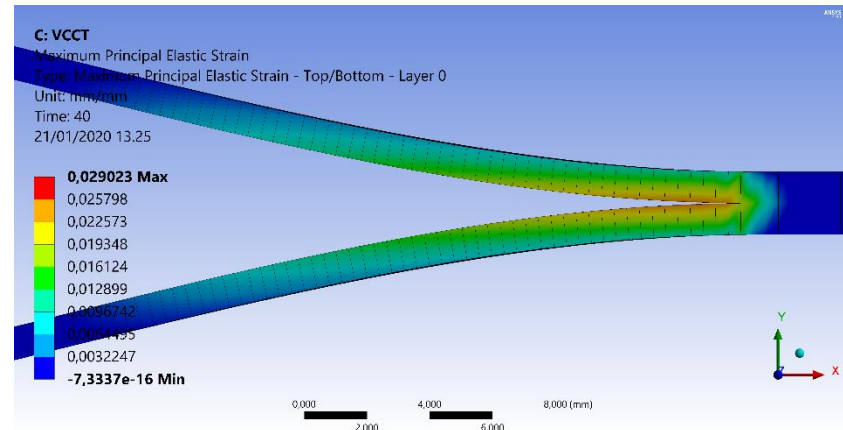


(b)

Gambar 4.5 Tampak *Isometric* Distribusi Tegangan pada Metode (a) CZM dan (b) VCCT



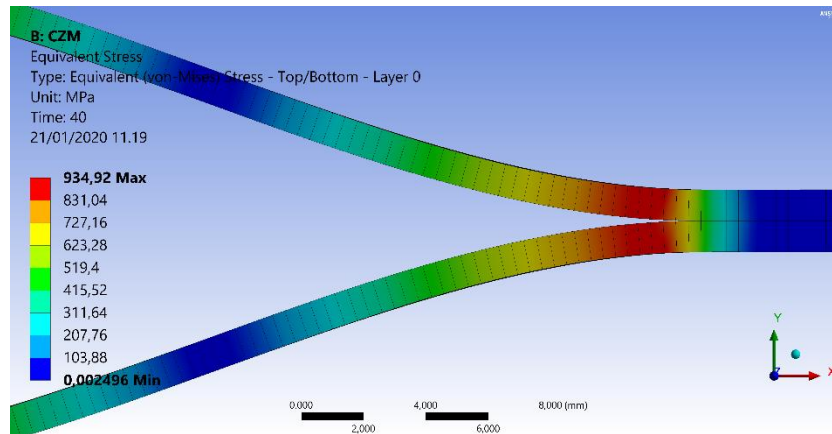
(a)



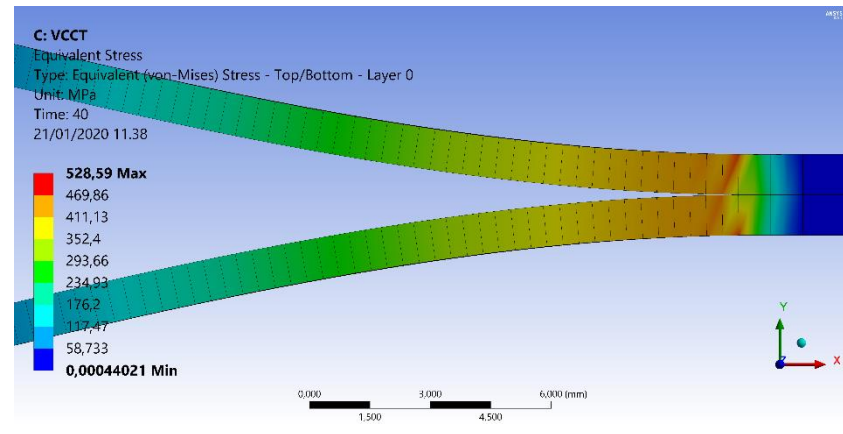
(b)

Gambar 4.6 Hasil *Equivalent Elastic Strain* dari metode CZM (a) dan VCCT (b)

Material CFRP :

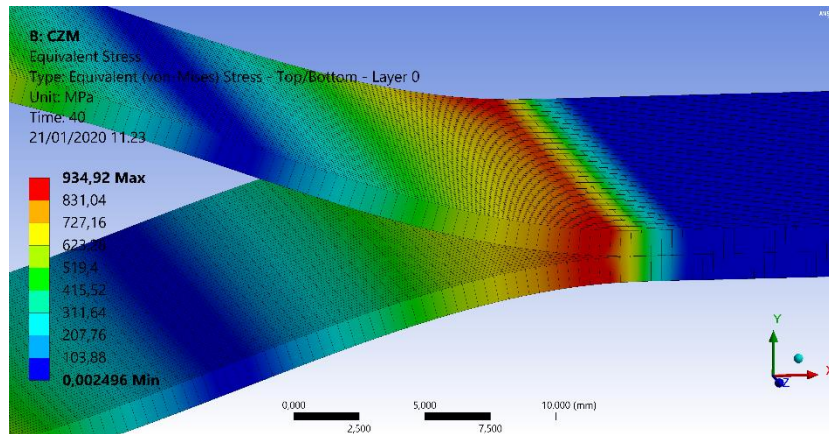


(a)

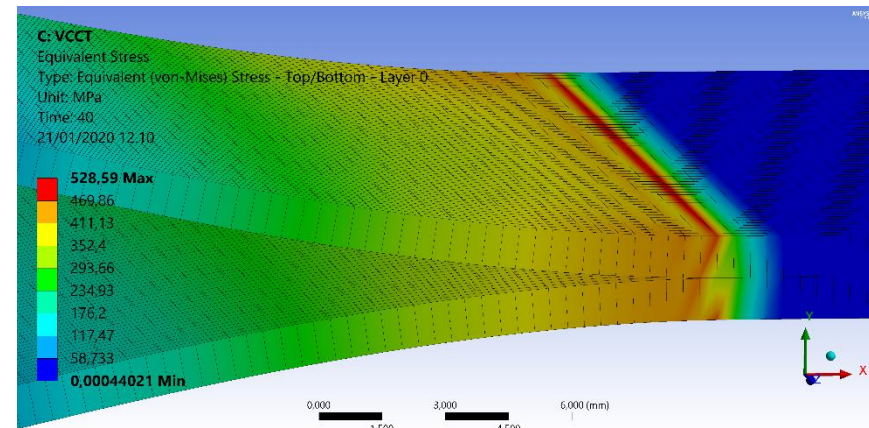


(b)

Gambar 4.7 Hasil *Equivalent Stress* pada Metode CZM (atas) dan VCCT (bawah)

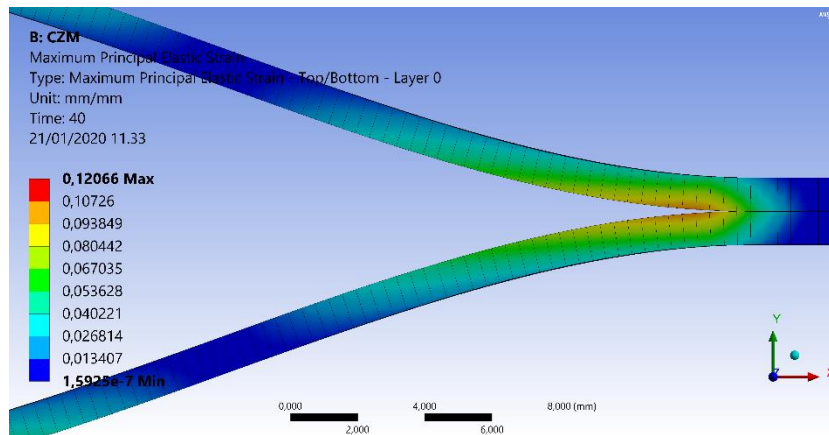


(a)

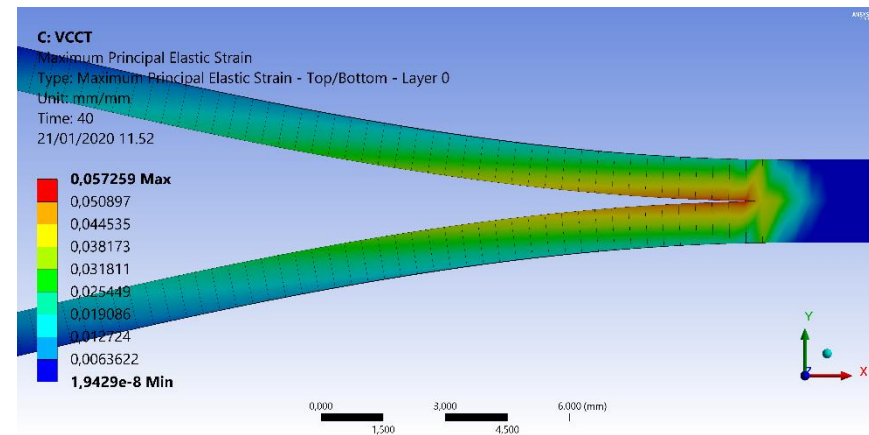


(b)

Gambar 4.8 Tampak *Isometric* Distribusi Tegangan pada Metode CZM (a) dan VCCT (b)



(a)



(b)

Gambar 4.9 Hasil *Equivalent Elastic Strain* dari metode CZM (atas) dan VCCT (bawah)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Delaminasi pada GFRP telah didekati dengan 2 metode numerik yang berbeda, yakni CZM dan VCCT. Dari ketiga metode tersebut, juga menghasilkan data dan hasil yang berbeda pula. Hal ini dapat diamati pada perambatan retak. Dengan menggunakan Equivalent Stress, dapat dianalisis persebaran dan distribusi tegangan pada masing-masing metode ketika diberikan displacement.

Dari sini, pada metode CZM dapat ditemukan pada crack tip, ketika diberikan displacement sebesar 40 mm, komposit mengalami tegangan tertinggi pada crack tip sebesar 453.05 MPa. Selain itu, crack direction juga lurus ke arah sumbu X. Model seperti ini juga dapat ditemukan di metode VCCT pada Gambar 4.4(b). Dengan memiliki model distribusi tegangan dan arah rambat retakan yang sama, metode VCCT mempresentasikan tegangan tertinggi pada crack tip sebesar 284.66 MPa, nilai yang cukup jauh berbeda bila dibandingkan dengan metode CZM. Perbedaan lain yang juga dapat diamati pada dua metode ini adalah persebaran atau distribusi tegangan pada $-$ crack-tip. Pada metode CZM, distribusi tegangan yang terjadi pada crack-tip lebih mencolok dibandingkan dengan bagian manapun pada GFRP.

Selain itu distribusi tegangan pada crack-tip cukup rata pada bagian atas dan bawah laminat. Dibandingkan dengan CZM, metode VCCT menampilkan hal yang cukup berbanding terbalik. Dimana distribusi tegangan tidak terlalu besar pada crack-tip, selain itu juga distribusi tegangan pada crack-tip tidak simetris dan merata seperti metode CZM. Meskipun memiliki model distribusi rambat retakan yang berbeda, nilai equivalent stress yang dihasilkan dari simulasi tidak jauh berbeda dari satu metode dengan metode yang lain, hanya saja, untuk metode VCCT dan CZM, perambatan retak terjadi pada bagian interface delamination, sehingga arah rambat retaknya lurus ke arah sumbu X dan tidak berbelok-belok.

Pada Gambar 4.5, dapat ditemukan bahwa dikarenakan nilai maximum equivalent stress-nya berbeda, hal ini juga berakibat pada distribusi tegangan yang terjadi pada laminat bagian atas, dimana pada metode CZM terjadi pemusatan tegangan merata

sepanjang area crack-tip. Sedangkan untuk metode VCCT, pemusatan tegangan hanya terjadi pada bagian atas (crack-nodes) sepanjang garis crack-tip.

Hal ini telah sesuai dengan teori dari masing-masing metode. Seperti yang telah dipaparkan pada subbab 2.10.1, bahwa pada metode cohesive zone, kapasitas pemindahan tegangan antara dua wajah (interfaces) yang terpisah dari delaminasi tidak hilang sepenuhnya pada saat inisiasi kerusakan, tetapi lebih merupakan peristiwa progresif yang diatur oleh pengurangan progresif dari antarmuka (interfaces) pada dua wajah (faces) yang terpisah. Sedangkan untuk metode VCCT, yang juga telah diuraikan pada subbab 2.10.2 dimana energi yang dihamburkan oleh pembentukan zona plastik di ujung retak (crack-tip) tidak dipertimbangkan. Selain itu juga pada Gambar 2.34 telah diproyeksikan model perambatan retak dengan VCCT, dimana terdapat penekanan beban pada titik (node) 2 dan 5, dan akan terus bergeser sesuai dengan urutan, dimana hal ini juga bisa dilihat pada hasil simulasi ANSYS Gambar 4.6 dimana hal yang sama juga ditampilkan oleh hasil dari keluaran Equivalent Elastic Strain, dimana distribusi kedua metode tersebut hampir mirip seperti pada distribusi tegangan.

Delaminasi pada CFRP telah didekati dengan 2 metode numerik yang berbeda, yakni CZM dan VCCT. Dari dua metode tersebut, juga menghasilkan data dan hasil yang berbeda pula. Hal ini dapat diamati pada perambatan retak. Dengan menggunakan Equivalent Stress, dapat dianalisis persebaran dan distribusi tegangan pada masing-masing metode ketika diberikan displacement.

Dari sini, dapat ditemukan pada crack-tip, ketika diberikan displacement sebesar 30mm, komposit mengalami tegangan tertinggi pada crack-tip sebesar 934,92 MPa. Selain itu, crack direction juga lurus ke arah sumbu X. Model seperti ini juga dapat ditemukan pada metode VCCT seperti Gambar 4.7(b).

Dengan memiliki model distribusi tegangan dan arah rambat retakan yang sama, metode VCCT mempresentasikan tegangan

tertinggi pada crack tip sebesar 528,59 MPa, nilai yang cukup jauh berbeda bila dibandingkan dengan metode CZM. Perbedaan lain yang juga dapat diamati pada dua metode ini adalah persebaran atau distribusi tegangan pada \pm crack-tip. Pada metode CZM, distribusi tegangan yang terjadi pada crack-tip lebih mencolok dibandingkan dengan bagian manapun pada CFRP. Selain itu distribusi tegangan pada crack-tip cukup rata pada bagian atas dan bawah laminat. Dibandingkan dengan CZM, metode VCCT menampilkan hal yang cukup berbanding terbalik. Dimana distribusi tegangan tidak terlalu besar pada crack-tip, selain itu juga distribusi tegangan pada crack-tip tidak simetris dan merata seperti metode CZM.

Meskipun memiliki model rambat retakan yang berbeda, nilai equivalent stress yang dihasilkan dari simulasi tidak jauh berbeda dantar satu metode dengan metode yang lain, hanya saja, untuk metode VCCT dan CZM, perambatan retak terjadi pada bagian interface delamination, sehingga arah rambat retakannya lurus ke arah sumbu X dan tidak berbelok-belok.

Pada Gambar 4.8, dapat ditemukan bahwa dikarenakan nilai maximum equivalent stress-nya berbeda, hal ini juga berakibat pada distribusi tegangan yang terjadi pada laminat bagian atas, dimana pada metode CZM terjadi pemusatan tegangan merata sepanjang area crack-tip. Sedangkan untuk metode VCCT, pemusatan tegangan hanya terjadi pada bagian atas (crack-nodes) sepanjang garis crack-tip.

Hal ini telah sesuai dengan teori dari masing-masing metode. Seperti yang telah dipaparkan pada subbab 2.10.1, bahwa pada metode cohesive zone, kapasitas pemindahan tegangan antara dua wajah (interfaces) yang terpisah dari delaminasi tidak hilang sepenuhnya pada saat inisiasi kerusakan, tetapi lebih merupakan peristiwa progresif yang diatur oleh pengurangan progresif dari antarmuka antar antarmuka pada dua wajah yang terpisah. Sedangkan untuk metode VCCT, yang juga telah diuraikan ada subbab 2.10.2 dimana energi yang dihamburkan oleh pembentukan zona plastik di ujung retak tidak dipertimbangkan. Selain itu juga

pada Gambar 2.34 telah diproyeksikan model perambatan retak dengan VCCT, dimana terdapat penekanan beban pada titik 2 dan 5, dan akan terus bergeser sesuai dengan urutan, dimana hal ini bisa kita lihat pada hasil simulasi ANSYS Gambar 4.9.

Hal yang sama juga ditampilkan oleh hasil dari keluaran Equivalent Elastic Strain, dimana distribusi kedua metode tersebut hampir mirip seperti pada distribusi tegangan.

Tabel 4.2 Perbandingan Parameter Karakteristik Delaminasi

No.	Aspek Pemandangan	CZM	VCCT
1	Nilai Validasi F_{crit}	Berada pada margin atas	Berada pada margin bawah
2	Tegangan Maksimum	Berada pada <i>crack-tip</i>	Berada pada <i>crack-nodes</i>
3	Distribusi Tegangan (<i>Stress Distribution</i>)	Distribusi relatif melengkung pada leher	Distribusi relatif lurus pada leher
4	Distribusi Regangan (<i>Strain Distribution</i>)	Relatif monoton dan simetris pada seluruh area <i>crack-tip</i>	Terdapat pola yang mirip seperti pada distribusi tegangan

Tabel 4.3 Perbandingan Akhir Setiap Metode Delaminasi

No	Parameter	CZM	VCCT
1	Kurva F_{crit} -Displacement	Kurang Sesuai	Sesuai
2	Validasi Error	Memiliki nilai minimum 5.71%	Memiliki nilai minimum 4.34%
3	Preparasi Simulasi	Memerlukan Interface Cohesive Delamination	Memerlukan Nilai ERR

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian telah dilakukan, dan hasil mengenai analisis simulasi delaminasi beserta pembahasannya telah dibahas secara rinci pada bab sebelumnya. Dari hasil pembahasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa:

1. Terlebih dulu dipastikan ukuran elemen yang paling tepat untuk digunakan dalam kasus ini. Secara umum, hasilnya diperoleh untuk ukuran elemen 0.4 mm diperoleh error terkecil untuk semua material dan semua metode.

Khusus: Untuk ukuran elemen 0.4 mm pada material CFRP dengan metode CZM, ditemukan anomali dimana secara teoritis nilai error-nya paling rendah, namun hasil ANSYS menunjukkan error paling tinggi. Namun tetap diambil karena memiliki margin error yang sangat kecil.

2. Karakteristik delaminasi dengan analisis material GFRP dan CFRP telah diobservasi dengan dua metode berbeda, hasilnya didapat CZM dan VCCT memiliki karakteristik yang berbeda pada beberapa parameter, yakni rentang nilai F_{crit} , posisi tegangan maksimum, distribusi tegangan, dan distribusi regangan.
3. Dengan menggunakan parameter kesimpulan pada poin pertama dan kedua, metode yang paling baik dan paling akurat yang dapat digunakan untuk mempelajari karakteristik delaminasi pada ANSYS *Workbench Mechanical* adalah metode VCCT. Hasil simulasi VCCT menunjukkan kesesuaian dengan teori kurva beban kritis, memiliki nilai *error* paling rendah terhadap validasi teoritis, dan tidak memerlukan preparasi *cohesive element area* seperti pada CZM.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya mengenai analisis numerik proses delaminasi yang terjadi pada material komposit, saran-saran

berikut dapat menjadi pertimbangan untuk memperdalam hasil dan mengetahui lebih jauh tentang simulasi delaminasi pada ANSYS Workbench, antara lain:

1. Perlu dilakukan penelitian *single-method* dengan beberapa parameter untuk menentukan kualitas dari hasil simulasi.
2. Beberapa parameter tersebut antara lain penentuan ukuran elemen, analysis settings, sifat mekanik material, dan geometri spesimen.
3. Respon yang ditarik dapat diperluas seperti analisis *stress failure*, *stress intensity factor*, dan nilai-nilai lainnya yang berkenaan dengan LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics) dan ILFM (Interlaminar Fracture Mechanics).

DAFTAR PUSTAKA

- Alger, Mark. S. M. 1997. **Polymer Science Dictionary (2nd ed.)**. New York: Springer Publishing.
- Barbero, Ever J. 2014. **Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS®**. Florida: Taylor & Francis Group, LLC.
- Bathe, Klaus-Jurgen. 2014. **Finite Element Procedures**. Massachusetts: Pearson Education, Inc.
- Benzeggagh, M L and Kenane, M. 1996. **Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus**. Composite Science and Technology, 56, pp. 439–449.
- Chawla, Krishan K. 2013. **Composites Materials Science and Engineering Third Edition**. New York: Springer.
- Davidson, B and Sun, X. 2006. **Geometry and Data Reduction Recommendations for a Standardized End-Notched Flexure Test for Unidirectional Composites**, Journal of ASTM International, 3, (9).
- Donaldson, Steven L., Miracle, Daniel B. 2001. **ASM Handbook Volume 21 Composites**. New York: ASM International.
- Herakovich, Carl T. 2017. **A Concise Introduction to Elastic Solids - An Overview of the Mechanics of Elastic Materials and Structures**. Cham: Springer
- J. Reeder, S. Kyongchan, P. B. Chunchu, and D. R.. Ambur. **Postbuckling and growth of delaminations in composite plates subjected to axial compression**. In 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, volume 1746, page 10, Denver, CO, 2002.
- Johnson, S J and Mangalgiri, P D. 1987. **Investigation of Fiber Bridging in Double Cantilever Beam Specimens**, ASTM Journal of Composites Technology and Research, 2, 10–13.

-
- Jones, R M. 1975. **Mechanics of Composite Materials**. Washington DC:McGraw-Hill Book Company.
- Kageyama, K Kimpara, I Ohsawa, I Hojo, M and Kabashima, S. 1995. **Mode I and Mode II Delamination Growth of Interlayer Toughened Carbon/Epoxy Composite System**. in Composite Materials: Fatigue and Fracture, Fifth Volume, STP 1230, American Society for Testing and Materials, 19–37.
- Lee, S M. 1993. **An Edge Crack Torsion Method for Mode III Delamination Fracture Testing**, Jnl. Comp. Tech. and Research, 15, (3), 193–201
- Li, J, Lee, S M Lee, E W and O’Brien, T K. 1997. **Evaluation of the Edge Crack Torsion (ECT) Test for Mode III Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites**. Jnl. Comp. Tech. and Research, 19, (3), 174–183.
- Martin, R H and Murri, G B. 1990. **Characterization of Mode I and II Delamination Growth and Thresholds in AS4/PEEK Composites**. in Composite Materials: Testing and Design, Ninth Volume, STP 1059, American Society for Testing and Materials, 251–270.
- Matthews, FL., Davies, GAO., Hitchings, D., Soutis, C. 2000. **Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures**. Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing Ltd.
- O’Brien, T K. 1990. **Towards a Damage Tolerance Philosophy for Composite Materials and Structures, Composite Materials: Testing and Design, Vol. 9, ASTM STP 1059, S P Garbo, Ed. pp. 7–33**. Philadelphia: ASTM.
- O’Brien, T K. 1998. **Composite Interlaminar Shear Fracture Toughness, G_{IIc} : Shear Measurement or Shear Myth?**. Composite Materials: Fatigue and Fracture, Seventh Volume, STP 1330, American Society for Testing and Materials, 3–18.
-

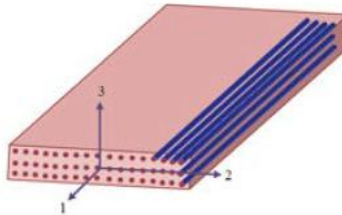
-
- Paris, I L. 2002. **Composite Materials Handbook (CMH-17-1F)**, Vol. 1, Chapter 6, section 6.8.7.1.
- Pascoe, J.A., Alderliesten, R.C., dan Benedictus, R., (2013), “Methods for the Prediction of Fatigue Delamination Growth in Composites and Adhesive Bonds - A Critical Review”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 112-113, pp. 72-96.
- Reeder, J R. 2002), **Composite Materials Handbook (CMH-17-1F)**, Vol. 1, Chapter 6, section 6.8.6.
- Russell, A J. 1982. **On Measurement of Mode II Interlaminar Fracture Energies**, Defence Research Establishment Pacific, Victoria, British Columbia, Canada, Materials DREP Report, 82–0.
- Shivakumar, K.N Chen, H Abali, F and Davies, C. 2006. **A Total Fatigue Life Model for Mode I Delaminated Composite Laminates**. *Int. J. of Fatigue*, 28, (1), 33–42.
- Shokrieh, M. M., Rajabpour-Shirazi, H., Heidari-Rarani, M., Haghpanahi, M. 2012. **Simulation of mode I delamination propagation in multidirectional composites with R-curve effects using VCCT method**. Tehran: Elsevier B.V.
- Sridharan, Srinivasan. 2008. **Delamination Behaviour of Composites**. Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing Ltd.
- Suk-Kyu, Ryu. 2008. **The Energy Release Rate and the Effect of Free Surface on Stress Intensity Factor in 3D Problem**. Texas: The University of Texas at Austin
- Sulistijono. 2012. **Mekanika Material Komposit, Edisi Pertama**. Surabaya: ITS Press.
- Waas, Victor D., Hidayat, Mas Irfan P., Noerochiem, Lukman. 2019. *Finite Element Simulation of Delamination in Carbon Fiber/Epoxy Laminate Using Cohesive Zone Model: Effect of Meshing Variation*. *Material Science Forum*, Vol. 964, pp 257-262.
- Wang, Chen., dan Xu, Xiwu., (2015), “Cohesive Element Analysis of Fatigue Delamination Propagation in Composite
-

-
- Materials with Improved Crack Tip Tracking Algorithm”, *Composite Structures*, Vol. 134, pp. 176-184.
- Wibowo, Anky Fitriani. 2019. **Analisa Faktor Intensitas Tegangan dan Usia Siklus pada Simulasi Perambatan Retak Komponen Poros Mesin Uap Menggunakan Metode SMART Crack Growth**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Wu, E M and Reuter, R C Jr. 1965. **Crack Extension in Fiberglass Reinforced Plastics**. T&AM Report No. 275, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois, Urbana, IL, February 1965.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Persamaan Konsitutif untuk Material Orthotropik

Bagian ini akan menerangkan tentang lamina searah (unidirectional lamina), dimana lamina searah atau lamina dan laminasi yang terbuat dari susun ini lamina searah. Oleh karena itu, akan diperkenalkan arahan material utama untuk sebuah lamina berserat searah. Dalam hal ini akan dilambangkan dengan arah 1-2-3. Arah 1 ada di sepanjang serat. Arah 2 dan 3 tegak lurus terhadap arah 1 dan saling tegak lurus masing-masing lain. Arah 3 adalah sepanjang ketebalan lamina. Dasar untuk pengambilan arah serat lamina ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arah lamina searah

Konstanta elastis yang membentuk matriks kekakuan (stiffness matrix) tidak secara langsung diukur dari uji laboratorium pada suatu material. Hal tersebut dapat diukur menggunakan konstanta teknik seperti modulus Young, modulus geser dan Rasio Poisson dari tes laboratorium. Hubungan antara konstanta teknik dan elastis konstanta matriks kekakuan juga tidak lurus ke depan. Hubungan ini dapat dikembangkan dengan bantuan hubungan antara konstanta teknik dan pemenuhan koefisien matriks.

Untuk membangun hubungan antara konstanta teknik dan pemenuhan koefisien, dipertimbangkan bahan ortotropik dalam arah material utama. Jika bahan ortotropik ini mengalami keadaan

tegangan 3D, strain yang dihasilkan dapat dinyatakan dalam hal komponen stress sebagai berikut:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1} - \frac{\nu_{11}}{E_2} \sigma_{22} - \frac{\nu_{31}}{E_3} \sigma_{33} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{22} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_{11} + \frac{\sigma_{22}}{E_2} - \frac{\nu_{32}}{E_3} \sigma_{33} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \sigma_{11} - \frac{\nu_{23}}{E_2} \sigma_{22} + \frac{\sigma_{33}}{E_3} \quad (3)$$

dengan komponen-*shear-strain engineering* diberikan sebagai:

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}} \quad (4)$$

$$\gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G_{13}} \quad (5)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (6)$$

Lampiran 2: Data Kurva *Stress-Strain* Hasil Pengujian Simulasi Delaminasi

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Material CFRP dengan Metode CZM

0.4 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0	0
0.2	55.39
0.4	110.18
0.7	191.39
1	270.55
1.2	270.41
1.4	270.41
1.7	270.41
2	270.41
2.2	270.41
2.4	270.41
2.7	270.41
3	270.41
3.2	270.41
3.4	270.41
3.7	270.41
4	270.41
4.2	270.41
4.4	270.41
4.7	270.41
5	270.41
5.2	270.41
5.4	270.41
5.7	270.41
6	270.41
6.2	270.41
6.4	270.41
6.7	270.41
7	270.41
7.2	270.41
7.4	270.41
7.7	270.41
8	270.41
8.2	270.41
8.4	270.41
8.7	270.41
9	270.41
9.2	270.41
9.4	270.41
9.7	270.41
10	270.41

0.5 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0	0
0.2	55.355
0.4	110.27
0.7	191.54
1	270.74
1.2	270.59
1.4	270.59
1.7	270.59
2	270.59
2.2	270.59
2.4	270.59
2.7	270.59
3	270.59
3.2	270.59
3.4	270.59
3.7	270.59
4	270.59
4.2	270.59
4.4	270.59
4.7	270.59
5	270.59
5.2	270.59
5.4	270.59
5.7	270.59
6	270.59
6.2	270.59
6.4	270.59
6.7	270.59
7	270.59
7.2	270.59
7.4	270.59
7.7	270.59
8	270.59
8.2	270.59
8.4	270.59
8.7	270.59
9	270.59
9.2	270.59
9.4	270.59
9.7	270.59
10	270.59

0.6 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0	0
0.2	55.41
0.4	110.38
0.7	191.71
1	270.96
1.2	270.82
1.4	270.82
1.7	270.82
2	270.82
2.2	270.82
2.4	270.82
2.7	270.82
3	270.82
3.2	270.82
3.4	270.82
3.7	270.82
4	270.82
4.2	270.82
4.4	270.82
4.7	270.82
5	270.82
5.2	270.82
5.4	270.82
5.7	270.82
6	270.82
6.2	270.82
6.4	270.82
6.7	270.82
7	270.82
7.2	270.82
7.4	270.82
7.7	270.82
8	270.82
8.2	270.82
8.4	270.82
8.7	270.82
9	270.82
9.2	270.82
9.4	270.82
9.7	270.82
10	270.82

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Material CFRP dengan Metode VCCT

0.4 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0	0
1	299.71
2	288.27
3	277.4
4	267.08
5	257.26
6	247.91
7	239.02
8	230.54
9	222.46
10	214.75

0.5 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0	0
1	300.22
2	285.98
3	272.63
4	260.09
5	248.31
6	237.23
7	226.81
8	216.98
9	207.71
10	198.96

0.6 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction (Y) [N]
0	0
1	300.68
2	283.66
3	267.91
4	253.3
5	239.73
6	227.12
7	215.37
8	204.42
9	194.2
10	184.65

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Material GFRP dengan Metode CZM

0.4 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction [Y] [N]
0	0
0.2	26.68
0.4	52.803
0.7	90.418
1	124.58
1.2	123.89
1.4	123.89
1.7	123.86
2	123.86
2.2	123.86
2.4	123.86
2.7	123.86
3	123.86
3.2	123.86
3.4	123.86
3.7	123.86
4	123.86
4.2	123.86
4.4	123.86
4.7	123.86
5	123.86
5.2	123.86
5.4	123.86
5.7	123.86
6	123.86
6.2	123.86
6.4	123.86
6.7	123.86
7	123.86
7.2	123.86
7.4	123.86
7.7	123.86
8	123.86
8.2	123.86
8.4	123.86
8.7	123.86
9	123.86
9.2	123.86
9.4	123.86
9.7	123.86
10	123.86

0.5 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction [Y] [N]
0	0
0.2	26.693
0.4	52.827
0.7	90.456
1	124.62
1.2	123.93
1.4	123.93
1.7	123.9
2	123.9
2.2	123.9
2.4	123.9
2.7	123.9
3	123.9
3.2	123.9
3.4	123.9
3.7	123.9
4	123.9
4.2	123.9
4.4	123.9
4.7	123.9
5	123.9
5.2	123.9
5.4	123.9
5.7	123.9
6	123.9
6.2	123.9
6.4	123.9
6.7	123.9
7	123.9
7.2	123.9
7.4	123.9
7.7	123.9
8	123.9
8.2	123.9
8.4	123.9
8.7	123.9
9	123.9
9.2	123.9
9.4	123.9
9.7	123.9
10	123.9

0.6 mm	
Displacement (mm)	Force Reaction [Y] [N]
0	0
0.2	26.709
0.4	52.857
0.7	90.502
1	124.67
1.2	123.98
1.4	123.98
1.7	123.95
2	123.95
2.2	123.95
2.4	123.95
2.7	123.95
3	123.95
3.2	123.95
3.4	123.95
3.7	123.95
4	123.95
4.2	123.95
4.4	123.95
4.7	123.95
5	123.95
5.2	123.95
5.4	123.95
5.7	123.95
6	123.95
6.2	123.95
6.4	123.95
6.7	123.95
7	123.95
7.2	123.95
7.4	123.95
7.7	123.95
8	123.95
8.2	123.95
8.4	123.95
8.7	123.95
9	123.95
9.2	123.95
9.4	123.95
9.7	123.95
10	123.95

Data F_{crit} terhadap Perubahan *Displacement* pada Material GFRP dengan Metode VCCT

0.4 mm	
Displacements (mm)	Force Reaction [Y] [N]
0	0
1	158.77
2	152.7
3	146.94
4	141.46
5	136.25
6	131.29
7	126.57
8	122.08
9	117.79
10	113.7

0.5 mm	
Displacements (mm)	Force Reaction [Y] [N]
0	0
1	159.05
2	151.5
3	144.41
4	137.76
5	131.51
6	125.62
7	120.1
8	114.88
9	109.97
10	105.33

0.6 mm	
Displacements (mm)	Force Reaction [Y] [N]
0	0
1	159.3
2	150.27
3	141.91
4	134.16
5	126.96
6	120.27
7	114.04
8	108.23
9	102.81
10	97.743

Lampiran 3. Data Kurva *Stress-Strain* Hasil Pengujian Simulasi Delaminasi

Data Kurva *Stress-Strain* untuk Material CFRP

CZM	
Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
95.128	0.01373
188.95	0.027271
325.97	0.047048
454.78	0.06564
453.13	0.065401
453.12	0.065399
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389
453.05	0.065389

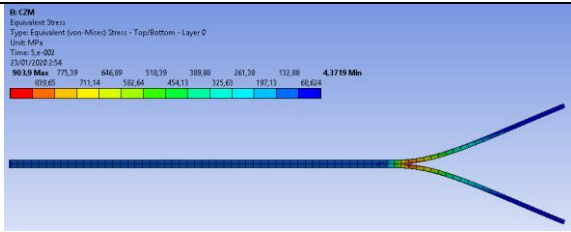
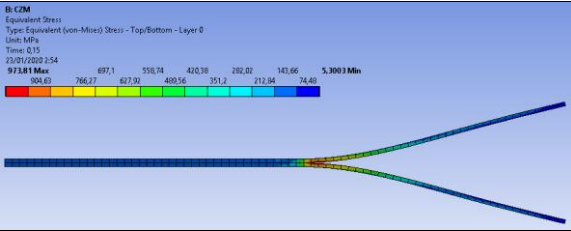
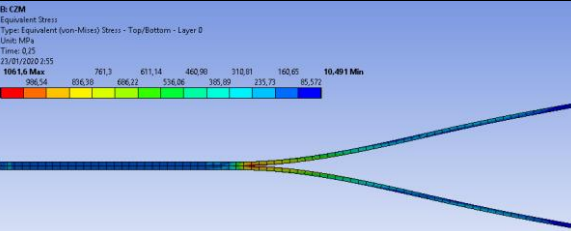
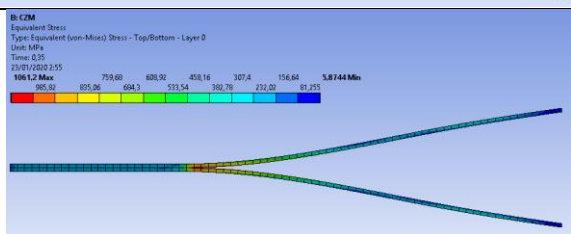
VCCT	
Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
632.81	0.092362
617.16	0.090078
602.09	0.087878
587.57	0.085757
573.57	0.083712
560.06	0.08174
547.02	0.079837
534.44	0.078
522.28	0.076225
510.54	0.07451
499.19	0.072853
488.21	0.07125
477.59	0.0697
467.32	0.0682
457.37	0.066748
447.73	0.065341
438.4	0.063979
429.36	0.062658
420.59	0.061379
412.09	0.060138
403.84	0.058934
395.84	0.057766
388.08	0.056632
380.54	0.055532
373.22	0.054463
366.1	0.053425
359.19	0.052416
352.47	0.051435
345.94	0.050482
339.59	0.049555
333.41	0.048653
327.4	0.047775
321.55	0.046921
315.86	0.04609
310.31	0.045281
304.91	0.044492
299.65	0.043724
294.52	0.042976
289.53	0.042247
284.66	0.041536

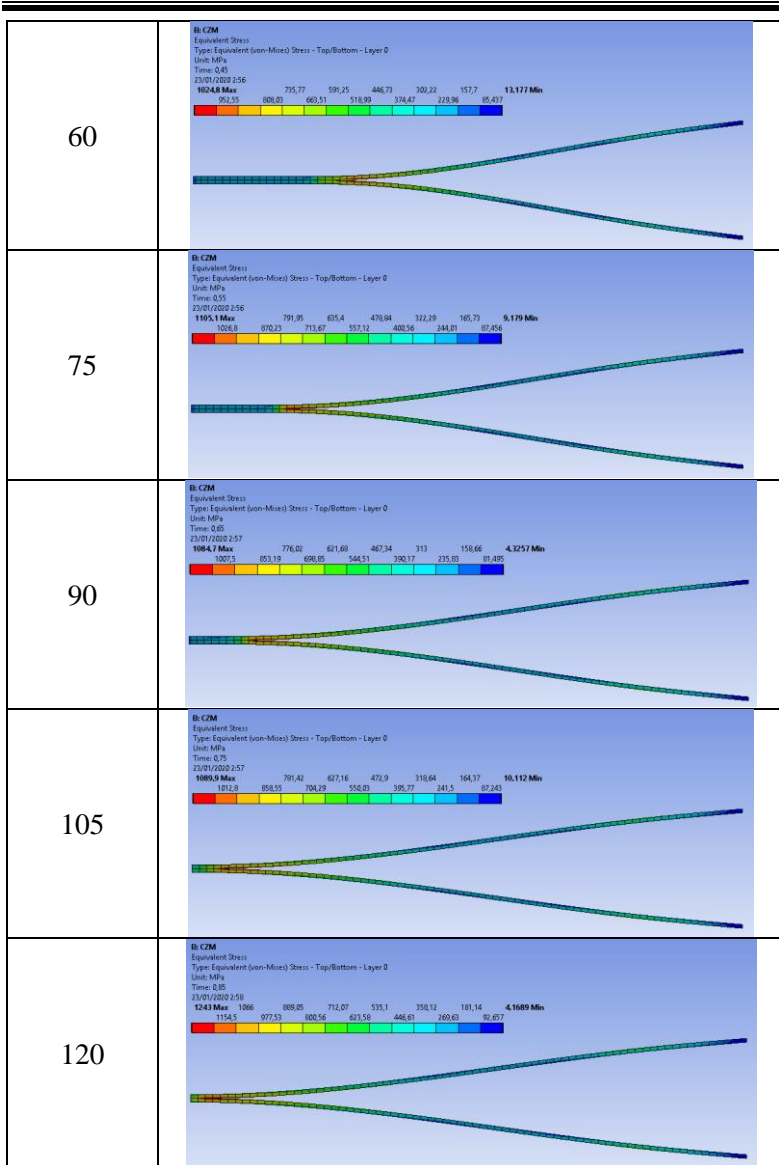
Data Kurva *Stress-Strain* untuk Material GFRP

CZM	
Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
189.78	0.030146
378.57	0.060135
659.24	0.10472
935.24	0.14856
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851
934.92	0.14851

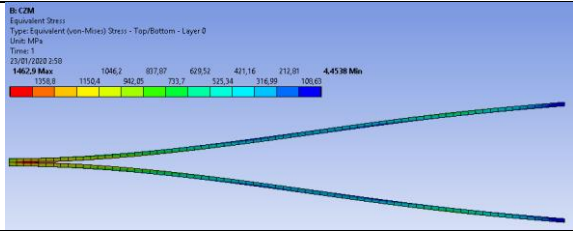
VCCT	
Stress (MPa)	Strain (mm/mm)
1183.9	0.19055
1154.3	0.18579
1125.9	0.18121
1098.4	0.17679
1072	0.17253
1046.5	0.16843
1021.9	0.16446
998.15	0.16064
975.23	0.15695
953.08	0.15338
931.67	0.14994
910.98	0.14661
890.97	0.14338
871.61	0.14027
852.88	0.13725
834.74	0.13433
817.18	0.1315
800.16	0.12876
783.67	0.12611
767.68	0.12354
752.17	0.12104
737.13	0.11862
722.54	0.11627
708.38	0.11399
694.62	0.11178
681.27	0.10963
668.29	0.10754
655.69	0.10551
643.43	0.10353
631.52	0.10162
619.93	9.98E-02
608.66	9.79E-02
597.69	9.62E-02
587.02	9.45E-02
576.63	9.28E-02
566.51	9.12E-02
556.66	8.96E-02
547.06	8.80E-02
537.71	8.65E-02
528.59	8.51E-02

Lampiran 4. Data perambatan retak per *time-step*

<i>Time-step</i>	Visual Perambatan Retak
1	 <p> 1 103.0 Max: 775.39, 646.09, 510.39, 389.88, 261.38, 132.88, 4.3719 Min 819.05, 711.14, 582.64, 454.13, 325.63, 197.13, 68.614 </p>
15	 <p> 15 973.81 Max: 897.1, 758.74, 610.39, 482.02, 342.66, 142.66, 5.3003 Min 806.63, 706.27, 627.92, 499.36, 351.2, 212.84, 74.49 </p>
30	 <p> 30 1061.6 Max: 761.3, 611.14, 460.98, 310.81, 160.85, 10.491 Min 938.54, 816.39, 696.22, 536.06, 385.89, 235.73, 85.572 </p>
45	 <p> 45 1061.2 Max: 759.68, 608.92, 438.16, 307.4, 156.64, 5.8744 Min 985.03, 855.26, 694.5, 533.54, 389.78, 232.02, 81.255 </p>



200



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 5: Pengujian Orisinalitas Tugas Akhir

Pengujian dengan Menggunakan Platform *iThenticate*

1/22/2020

Similarity Report

FinalProject
By: Dimas B Setiawan
As of: Jan 21, 2020 8:41:36 PM
20,383 words - 72 matches - 41 sources

Similarity Index

6%

Mode: Similarity Report

paper text:

1BAB II TINJAUAN PUSTAKA 1.1

Material Komposit Komposit didefinisikan sebagai suatu material yang terdiri dari dua komponen atau lebih yang memiliki sifat atau struktur yang berbeda yang dicampur secara fisik menjadi satu membentuk ikatan mekanik yang dengan struktur homogen secara makroskopik dan heterogen secara mikroskopik. **Material campuran tersebut akan menghasilkan material yang baru yang memiliki sifat unggul dari material pembentuknya. Dengan penggabungan dua atau lebih material yang berbeda, maka dapat diperbaiki dan dikembangkan sifat-sifat mekanik dan fisik dari material-material tersebut**

diantaranya adalah: **kekuatan, kekakuan, ketahanan korosi, ketahanan gesek, konduktivitas termal, insulasi listrik, insulasi panas, ketahanan fatik,**

dan lain-lain (Sulistijono, 2012). Pada dasarnya, kita dapat mempertimbangkan komposit sebagai bahan apa saja yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih konstituen yang berbeda. Definisi ini akan mencakup batu bata, beton, kayu, tulang, serta komposit sintesis modern seperti plastik yang diperkuat serat (FRP). Perkembangan komposit dalam 50 tahun terakhir telah berhasil menurunkan kuantitas massa tanpa mengurangi performa dan abilità dari komposit. Bahan-bahan seperti itu kadang-kadang disebut sebagai high-performance composites, dan sering kali terdiri dari serat karbon dan resin epoksi (Matthews, 2000). Gambar 2.1 menunjukkan beberapa jenis high-performances composites yang banyak digunakan untuk kebutuhan otomotif, teknik, maupun manufaktur. Gambar 2.1 Contoh dari Material Komposit: Velg (kanan) dan Wing (kiri) yang merupakan material komposit Carbon Fiber- reinforced Polymer (Top Gear, 2016) Namun, penggunaan secara umum, bahan komposit dibatasi untuk menekankan material yang mengandung konstituen matriks kontinu yang terikat (binded) bersama dan membentuk kesatuan konstituen yang lebih kuat dan rigid.

Material komposit yang dihasilkan memiliki keseimbangan sifat struktural dan performa yang lebih

Data kesamaan kata dan kalimat per individu konten

FinalProject : Delamination Analysis using ANSYS Workbench

ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	id.scribd.com Internet	693 words — 3%
2	anzdoc.com Internet	105 words — < 1%
3	Raju, I S, and T K O'Brien. "Fracture mechanics concepts, stress fields, strain energy release rates, delamination initiation and growth criteria", Delamination behaviour of composites, 2008. Crossref	68 words — < 1%
4	repository.its.ac.id Internet	47 words — < 1%
5	text-id.123dok.com Internet	40 words — < 1%
6	id.123dok.com Internet	34 words — < 1%
7	mafiadoc.com Internet	33 words — < 1%
8	jaredharvey.com Internet	32 words — < 1%
9	www.scribd.com Internet	26 words — < 1%
10	es.scribd.com Internet	17 words — < 1%

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penutup penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang selalu menjadi sumber perlindungan dan kekuatan bagi penyusun dalam melaksanakan penelitian Tugas Akhir.
2. Orang tua, kakak, adik yang selalu mendukung serta memberikan doa selama penelitian Tugas Akhir dan penyusunan laporan.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing 1 Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, dan memberikan banyak ilmu, serta kesabaran yang luar biasa kepada penulis, serta juga membantu penulis dalam menyelesaikan permasalahan Tim Antasena ITS.
4. Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing 2 Tugas Akhir yang telah membimbing, membantu, serta memberikan banyak ilmu pengetahuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini maupun ilmu pengetahuan lain yang sangat berguna bagi penulis, serta keikhlasannya dalam membantu perkembangan kehidupan perkuliahan penulis selama berkuliah di ITS, baik dalam Tim Munisi Frangible ITS, maupun Tim Antasena ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyananta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI ITS, sekaligus dosen wali penulis selama berkuliah di ITS.
6. Pak Moko, Pak Anto, Pak Sumarsono, Mas Ridha, Pak Tari, dan seluruh karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis.
7. Keluarga Besar Tim Antasena ITS yang secara langsung memberikan ilmu yang sangat bermanfaat baik *softskill* maupun *hardskill*.

8. Holly Indi Ramadhian *quod provisum est ad preparationem cordis, patientiae et multum prodesse ad bellandum. Danke schön.*
9. *Rencang-rencang cangkruk HIMKA-C32 & HMMT-MT17 sedoyo ingkang purun ngerencangi ngopi nalika waktu ngendas utawi gabut.*
10. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Dimas Bagus Setiawan. Penulis dilahirkan di Banyuwangi, 19 September 1995, dan merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Al-Khairiyah, SDN 1 Kepatihan, SMP Negeri 1 Giri, dan SMA Negeri 1 Glagah. Penulis kemudian melanjutkan studinya di Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2015 dengan NRP 0251154000087.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi di BSO MTC HMMT FTI-ITF sebagai Staf Divisi Aplikatif kepengurusan 2016/2017. Penulis juga berpartisipasi aktif dalam Tim Peluru *Frangible*. Penulis tergabung dalam Tim Antasena ITS kepengurusan 2017/2018 yang berperan sebagai *General Manager*. Dalam mengembangkan potensi di bidang teknologi dan keinsinyuran, penulis pernah mengikuti kompetisi beberapa kompetisi internasional diantaranya 17th *Malaysia Technology Expo* (MTE) 2018 dan memperoleh penghargaan *Merit Award*. Selain itu penulis juga pernah berpartisipasi dalam ajang *The 4th International Young Inventors Awards* dan memperoleh penghargaan berupa medali emas. Serta menjadi pembicara dalam beberapa kegiatan seperti PKTI HMMT FTI-ITS 2018 dan BMS HMMDM ITS 2019.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)